

UCA-CYT
T.A.I 2
Trabajo de Investigación
Bioingeniería
Diego L. Manchini P.
2005

INDICE

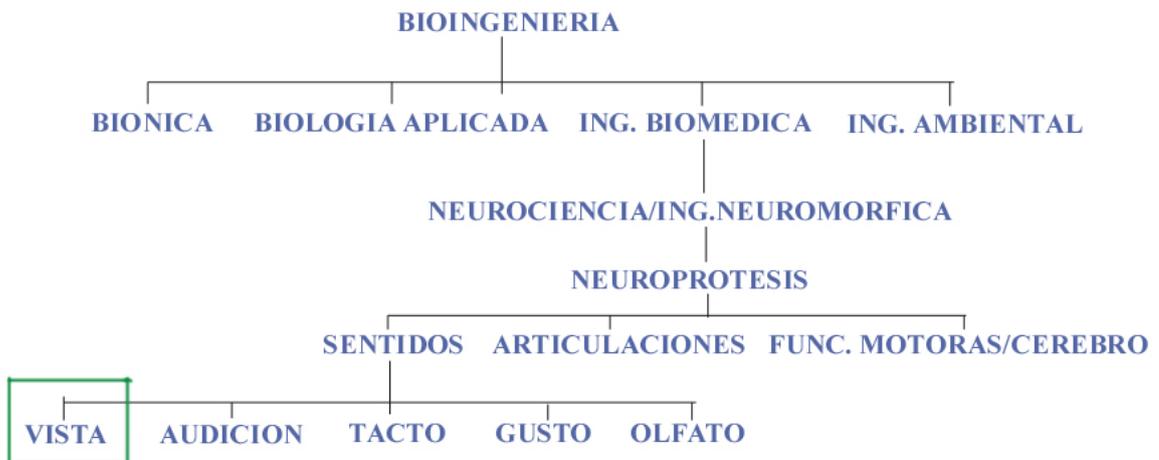
- Introducción
- Bioingeniería. Concepto
- Antecedentes y surgimiento de la Bioingeniería
- Las áreas que comprende la Bioingeniería
- Neurociencia. Ingeniería Neuromórfica. Introducción
- El sistema nervioso
- Objetivos de la neurociencia
- Neurociencia y Salud
- Neurociencia, informática y robótica
- Neuroprótesis como aplicación directa de la Neurociencia
- Ejemplos generales
- Prótesis cocleares para sordos
- Recuperación de movilidad
- Introducción gral. Sobre situación de personas no videntes
- Introducción a la Ingeniería neuromórfica
- Hardware reconfigurable
- Proyecto Cortivis
- Proyecto Ecovision
- Proyecto Spike Force
- Prótesis de retina intraocular MARC
- Retina artificial de silicio OPTOBIONICS TM (ASR)
- Sensores ultrasónicos para no videntes. Dispositivo Treboli
- El Electrodo Intracortical del Prof. Normann (Universidad de Utah)
- Dobelle Eye
- Ojo electrónico
- Microchips
- Avances tecnológicos para ciegos
- Conclusión
- Bibliografía

Introducción

En el presente trabajo se realiza una investigación sobre la Bioingeniería. Debido a que ésta es una ciencia que abarca diversos ámbitos, se ve la necesidad de ir desglosándola en sus diferentes ramas para poder ir siendo más concretos, y sobre todo, ir llegando específicamente a su aplicación directa en la realidad a través de la utilización, en este caso, de la tecnología.

Se comienza con un concepto básico de Bioingeniería, para luego ir citando sus áreas de aplicación; se elige una de ellas, que es la Ingeniería Biomédica, pero a la vez ésta es muy genérica y tiene diversas ramas, entonces se elige la rama de la Ingeniería Neuromórfica o Neurociencia. Dentro de esta rama de la Ingeniería Biomédica, se eligió investigar sobre las neuroprótesis, que ayudan a mejorar la calidad de vida de personas discapacitadas en cualquier ámbito. Pero como todavía esto es un poco general, se elige realizar el estudio sobre las neuroprótesis que son realizadas con el fin de ayudar a personas no videntes.

De esta manera, de lo general que es la Bioingeniería, se llega a lo particular de las neuroprótesis para no videntes, que como se puede deducir, es una de las múltiples ramas de la Bioingeniería.



Bioingeniería

Concepto

Una de las definiciones más aceptadas de Bioingeniería es aquella propuesta en 1972 por el "Committee of the Engineer's Joint Council" de los Estados Unidos:

"La Bioingeniería es la aplicación de los conocimientos recabados de una fértil cruzada entre la ciencia ingenieril y la médica, tal que a través de ambas pueden ser plenamente utilizados para el beneficio del hombre".

Esta definición implica una colaboración que normalmente no puede obtenerse dentro de la estructura de cada disciplina por separado.

Otra definición, realizada por Heinz Wolff en 1970, es la siguiente:

"La Bioingeniería consiste en la aplicación de las técnicas y las ideas de la ingeniería a la biología, y concretamente a la biología humana. El gran sector de la Bioingeniería que se refiere especialmente a la medicina, puede llamarse más adecuadamente Ingeniería Biomédica".

Otra definición general es la siguiente:

Es el diseño de modelos y dispositivos que imitan o se inspiran en "inventos" de la vida. Algunos de sus logros sirven de prótesis o material de recambio (marcapasos, riñones artificiales, audífonos, dializadores, etc.). Este notable conjunto se denomina "bioingeniería médica". Otros logros son equipos y procesos donde mediante la propagación de pequeñísimos seres vivos se pueden generar productos interesantes para el hombre (antibióticos, alimentos, bebidas, enzimas, productos industriales obtenidos por fermentación, cultivos celulares, tisulares y parenquimáticos). Estos casos son los de la "bioingeniería de las fermentaciones" y de cultivos de células o similares, que considera el diseño y operación de biorreactores donde una de las etapas es la propagación de seres vivos (antibióticos, etc.). La "ingeniería genética", que manipula el mensaje genético, es la más espectacular dentro de estas aplicaciones. La "ingeniería enzimática" se preocupa del diseño y manejo de biorreactores donde las enzimas (fabricadas de antemano) tienen el papel principal (por ejemplo, en la fabricación de jarabes de alta fructosa). La "bioingeniería que reconstruye con varios biorreactores las etapas de la digestión de los tri y tetragástricos" (camélidos y vacunos, entre otros, por ejemplo con leche modificada por "bioingeniería de las proteínas" como producto final) son otra especialidad afín. La bioingeniería alimentaria se suele denominar ingeniería de alimentos y uno de sus capítulos es la bioingeniería de las fermentaciones alimentarias. La ingeniería fotoquímica que imita la fotosíntesis, también. La ingeniería sanitaria o ingeniería ecológica es también bioingeniería cuando el material que se busca degradar es biológico. Exagerando, sería bioingeniería hasta la ingeniería aeronáutica, la naval, la agrícola, la pesquera y las tecnologías de aplicación en los desarrollos culturales humanos, como la ingeniería social, económica, de empresas, etc., pero esa exageración no es, por supuesto, de uso habitual.

Antecedentes y surgimiento de la Bioingeniería

Antes de la segunda guerra mundial, el personal médico y los investigadores en el campo de la biología se valían de técnicas de ingeniería que fuesen relativamente sencillas y cayesen dentro de sus conocimientos. Por ejemplo, un fisiólogo investigador se hubiera sentido muy satisfecho si para llenar las necesidades de su laboratorio hubiese podido contar con un soplador de vidrio, un carpintero y un mecánico a su disposición. Como los fundamentos del diseño de los instrumentos que necesitaba encajaban bien dentro de sus conocimientos teóricos y prácticos, hubiera podido especificar con toda claridad lo que quería, y ese equipo de obreros especializados lo hubieran construido de acuerdo con su diseño.

Fue un accidente histórico lo que hizo que por vez primera en Gran Bretaña un gran número de biólogos adquiriesen sólidos fundamentos en el campo de la electrónica, abriendo de este modo rápidamente la posibilidad de aplicar técnicas más elaboradas en la resolución de los problemas biológicos y médicos. Al estallar la segunda guerra mundial, los químicos, físicos e ingenieros fueron rápidamente acaparados por aquellos que eran responsables de la fabricación de municiones, de aviones, etc. Para cuando se hizo evidente que en el campo del radar hacía falta trabajar mucho para lograr desarrollarlo, resultó que los biólogos eran casi los únicos científicos que quedaban disponibles para hacer este trabajo.

En los años inmediatos de la posguerra muchos biólogos estaban, por tanto, bien impuestos en lo que constituían los últimos adelantos en el campo de la electrónica. Naturalmente, ellos los enfocaron hacia ciertos temas especializados. Pero la tecnología electrónica progresó muy rápidamente y los biólogos, que se habían familiarizado antaño con el manejo de válvulas y grandes componentes, pronto se vieron a la zaga en una nueva era de transistores y componentes en miniatura, y como los conocimientos de los antiguos investigadores quedaron anticuados, empezó a surgir una nueva generación de médicos y biólogos, sin ninguna práctica en el campo de la electrónica.

Los investigadores dentro del campo de la biología y la medicina vieron claramente que ganarían una incalculable cantidad de tiempo no sólo si se familiarizaban con los adelantos técnicos existentes, sino también si iban dando paso a los nuevos que fuesen llegando. Entonces surgió la necesidad de un nuevo tipo de persona que hiciese de puente sobre el hueco que separaba a la elaborada tecnología de la ingeniería de las ciencias biológicas. En pocas palabras, surgió la necesidad de los bioingenieros.

Fueron distintas instituciones las que por diferentes caminos vieron patente esta necesidad. Algunas empezaron a reclutar técnicos, que habían de trabajar ciñéndose casi exclusivamente al desarrollo de los instrumentos y que, al menos en principio, no tenían la categoría de investigadores. Otras instituciones fueron más rápidas en darse cuenta de la importancia de este asunto y contrataron a personal graduado, equiparándole con sus compañeros médicos y biólogos.

En este estado de cosas no había sido reconocida todavía la carrera de Bioingeniería, e incluso no se había acuñado la palabra correspondiente. ¿Quiénes fueron, por tanto, los primeros bioingenieros en una época en la que todavía no existía un método adecuado para la formación de estas personas?

La mayoría de ellos fueron científicos del campo de las ciencias biológicas, con frecuencia médicos, los cuales se dedicaban a la ingeniería como entretenimiento o tenían un especial talento para ello. Esto no es sorprendente si uno piensa que es casi una tradición el que los médicos y cirujanos sean ingenieros aficionados.

En realidad, lo que hoy llamamos Ingeniería Biomédica se llamó al principio Electrónica Médica, y la asociación internacional constituida por los que practicaban esta actividad se conoció como "International Federation of Medical Electronics" (Federación Internacional de Electrónica Médica). Hasta 1965 no fue adoptado el título actual, mucho más adecuado, de "The International Federation of Medical and Biological Engineering" (Federación Internacional de Ingeniería Médica y Biológica).

Las Áreas que comprende la Bioingeniería

Pueden visualizarse cuatro ramas mayores en el campo de la Bioingeniería:

Biónica: Es la aplicación de los principios de los sistemas biológicos a modelos ingenieriles con el fin de crear dispositivos específicos.

Biología Aplicada: Es la utilización de los procesos biológicos extendidos a escala industrial para dar lugar a la creación de nuevos productos.

Ingeniería Biomédica: Es la aplicación de la ingeniería sobre la medicina en estudios con base en el cuerpo humano y en la relación hombre-máquina, para proveer la restitución o sustitución de funciones y estructuras dañadas y para proyectar y luego construir instrumentos con fines terapéuticos y de diagnóstico. Esta es la rama de la Bioingeniería donde se verifica más directamente el impacto entre la medicina y la ingeniería.

Ingeniería Ambiental: Es el uso de la ingeniería para crear y controlar ambientes óptimos para la vida y el trabajo.

Dentro de lo que es la bioingeniería, se encuentra la ingeniería biomédica como se ha citado, es decir la aplicación de los avances tecnológicos en la medicina, para restituir o mejorar daños causados en el organismo humano. Y a su vez dentro de ésta se encuentra la rama de la Neurociencia, que es la que será mayormente analizada.

Neurociencia. Ingeniería Neuromórfica.

Introducción

A fines del siglo XX asistimos a una revolución en biología que no tiene precedentes en la historia. Los conocimientos sobre el cerebro avanzan a tal ritmo, que cada día se percibe más su impacto social.

¿Qué son la conciencia y la mente humana? ¿Por qué experimentamos emociones?
¿Por qué aparecen las enfermedades psiquiátricas o neurológicas? Estas son algunas preguntas básicas que la neurociencia intenta contestar en beneficio de la humanidad.

La Neurociencia estudia el sistema nervioso desde un punto de vista multidisciplinario, esto es mediante el aporte de disciplinas diversas como la Biología, la Química, la Física, la Electrofisiología, la Informática, la Farmacología, la Genética, etc. Todas estas aproximaciones, dentro de una nueva concepción de la mente humana, son necesarias para comprender el origen de las funciones nerviosas, particularmente aquellas más sofisticadas como el pensamiento, emociones y los comportamientos.

Todo comportamiento es el resultado de una actividad y función cerebral. El explicar el comportamiento animal en función de la actividad que el sistema nervioso realiza es el objetivo de la neurociencia. La función del cerebro es recoger información del medio ambiente donde el animal se desenvuelve, analizar esta información y tomar decisiones. La acción final está basada en resultados computacionales hechos en el cerebro. Un sistema nervioso puede ser considerado como una caja negra: ingreso de la información (input)-> computarizar la información y tomar decisiones-> salida (output) = comportamiento. La Neurociencia investiga el trabajo que ocurre en esta “caja negra.” En esta investigación contribuyen otras ciencias como la neuroetología, neurofisiología, anatomía, fisiología, medicina, física, química y matemáticas entre otras.

Las neuronas usan señales estereotipadas eléctricas para procesar toda la información recibida por el sistema sensorial y posteriormente analizarla. Las señales nerviosas son símbolos que no representan por sí solos el medio exterior, por lo que es un proceso esencial el decodificar las señales neuronales y su significado. En efecto, el origen de las fibras nerviosas y su destino dentro del sistema nervioso determinan el contenido de la información transmitida. Por ejemplo, en los mamíferos los nervios en el nervio óptico, al igual que las vías nerviosas ascendentes que van hacia el neocórtex son los que llevan la información visual del entorno del animal. El nervio acústico lleva la información de los cambios de la presión de sonido fuera del oído del vertebrado desde el caracol del oído interno hacia la corteza auditiva. El significado de las señales eléctricas neuronales depende de la fuente de origen y el blanco de las interconexiones neuronales.

En la siguiente sección se dará una introducción a la neurociencia basada en descripciones de neuronas, señales neuronales, organización jerárquica de la organización del cerebro en los vertebrados con una explicación final de las bases neuronales del lenguaje.

La unidad básica del cerebro es la neurona

La unidad funcional más pequeña del sistema nervioso es la neurona. Las neuronas son las que forman el cerebro y realizan las computarizaciones. El cerebro difiere entre los diferentes grupos del reino animal. En efecto el cerebro de un artrópodo consiste de un ganglio supraoesofágico y de un ganglio suboesofágico. Ganglios adicionales se encuentran en el tórax y en el abdomen del animal. Este tipo de sistema nervioso es segmentado a diferencia del sistema nervioso en los vertebrados que es centralizado.

En general la mayoría de las neuronas tienen cuatro regiones funcionales en común: un componente de entrada (input) con ramificaciones de dendritas, un cuerpo el cual contiene el núcleo, los componentes de gatillo (trigger) e integración (los cuales disparan un potencial de acción en el axón de hillock) y finalmente un componente de conducción, el axón. Al final del axón se encuentra la cuarta región, el componente de salida (output) donde se localizan las sinapsis.

Generalmente se reconocen dos tipos funcionales de neuronas: neuronas locales y proyeccionales. Estas neuronas fueron descritas por primera vez por Camilo Golgi en el sistema nervioso de vertebrados. Golgi desarrolló un método de tinción y reconoció las neuronas locales o células stellate y neuronas proyeccionales con axones. Neuronas stellate o locales realizan computaciones locales mientras que las neuronas de proyección transmiten los resultados de las neuronas locales hacia otros núcleos y regiones en el cerebro. Las áreas blancas pueden estar a una distancia de hasta un metro.

Señalización neuronal: potenciales locales y de acción

Todas las neuronas usan señales eléctricas basadas en las diferencias de concentración de iones entre los espacios extracelulares e intracelulares. Las diferencias en las concentraciones de sodio (Na^+) y potasio (K^+) resultan en un potencial eléctrico a lo largo de la membrana celular de las neuronas. El potencial de descanso (resting potential) de una neurona está representado por el valor del potencial eléctrico en equilibrio.

Basado en el equilibrio de los potenciales, las señales neuronales consisten de cambios del potencial de la membrana producido por corrientes de iones fluyendo a través de las membranas celulares. Estos cambios son llevados por el sodio, potasio, calcio o cloro.

Las neuronas usan solamente dos tipos de señales: potenciales localizados (graduados) y potenciales de acción.

Los localizados, potenciales graduados, pueden extenderse únicamente a cortas distancias de hasta 1-2 mm. Ellos juegan un rol esencial en regiones especiales tales como terminaciones del nervio sensorial (donde son llamados receptores potenciales) o en uniones entre células (donde son llamados potenciales sinápticos). Los potenciales localizados posibilitan a las células nerviosas la realización de las funciones integrativas al igual que inician el potencial de acción en el axón hillock. Los potenciales de acción son impulsos regenerativos que son conducidos a través de largas distancias sin atenuación. Estos dos tipos de señales son el lenguaje universal de las células nerviosas en todos los animales estudiados.

Las neuronas se comunican entre sí a través de sinapsis, las cuales pueden ser eléctricas o químicas. Sinapsis eléctricas se encuentran en el empalme cercano entre dos neuronas donde las corrientes de iones se pasan directamente a la neurona vecina.

Sinapsis químicas liberan sustancias transmisoras y los receptores postsinápticos determinan los efectos de los potenciales de acción presinápticos en los potenciales eléctricos postsinápticos. La interacción sináptica – postsináptica podría ser excitatoria o inhibitoria, dependiendo del neurotransmisor y de los receptores postsinápticos de la señal.

En la conexión sináptica entre neuronas ocurren memoria y aprendizaje. La memoria de corto plazo esta representada por cambios en la fuerza sináptica entre las neuronas relacionadas. La memoria de largo plazo se basa en interacciones entre las sinapsis y el núcleo de la célula, donde cambios sinápticos a largo plazo involucran la activación de la expresión genética, síntesis de nuevas proteínas y la formación de nuevas conexiones sinápticas (Kandel 2001, Science). Estos cambios relacionados en memoria y aprendizaje son probablemente mecanismos universales en todos los animales.

Organización jerárquica del cerebro en los vertebrados

Los cambios en los parámetros físicos medio ambientales y eventos son importantes en la determinación del comportamiento animal. Los sistemas sensoriales traducen los eventos físicos (estímulos) a potenciales locales y de acción en el sistema nervioso.

Los eventos traducidos, son posteriormente procesados en las vías ascendentes neuronales (ascending neuronal pathways). Los análisis del estímulo son realizados en las vías ascendentes sensoriales (ascending sensory pathways) en todas las partes que conforman el cerebro de los vertebrados. Todas las vías sensoriales son paralelas a través del cerebro y procesan paralelamente la información.

Finalmente la información crítica para el comportamiento es extraída de las señales provenientes de los sentidos y se generan patrones neuronales de contracción muscular. En las vías descendentes de las células efectoras, por ejemplo músculos para el movimiento, existe una organización sistemática paralela de igual manera que en las vías sensoriales ascendentes.

En los vertebrados el cerebro esta dividido en cinco partes miel-, met-, mes-, di-, y telencéfalo. Diferentes regiones del cerebro están especializadas para desempeñar diferentes funciones. Esta diferenciación se encuentra a través de las vías sensoriales ascendentes y motoras descendentes. Las proyecciones finales de las vías sensoriales y las áreas donde se empiezan a generar los comandos para el movimiento se encuentran en las regiones del neocortex. Estas áreas pueden ser localizadas externamente en el cerebro y se conoce cual región es responsable de una determinada función en el caso del cerebro humano. En el caso de informaciones somatosensoriales, por ejemplo, en el tacto el área de proyección esta en el lóbulo parietal del cerebro. Aquí la superficie de nuestro cuerpo no esta representada por la superficie de las partes del cuerpo sino por el grado de innervación de esa parte. Así el input sensorial que viene de las manos y labios ocupan la mayor parte de la corteza cerebral que el input sensorial que viene de la pierna. Todos los sistemas sensoriales y motores siguen un patrón jerárquico y de procesamiento paralelo.

Procesamiento neuronal complejo: Comunicación humana

El lenguaje podría ser considerado como uno de los más complejos comportamientos cognitivos y probablemente el más evolucionado del comportamiento humano. Este comportamiento empieza con la traducción de cambios de sonidos por parte de las células sensoriales ciliadas en la cóclea del oído interno. Los estímulos físicos son traducidos en picos de potenciales de acción. La posición de las células sensoriales ciliadas en la cóclea seguida de las neuronas ascendentes del VIII nervio craneal en el núcleo cóclea representan la frecuencia del estímulo acústico, más conocida como representación tonotópica de la frecuencia del sonido percibido. El primer núcleo receptor en el cerebro es el núcleo coclear, el cual está situado en la médula (metencéfalo). La vía neural pasa a través del colliculus inferior (mesencéfalo) del núcleo geniculado medial y termina en la neocórtex auditiva (telencéfalo).

La corteza auditiva está localizada en el lóbulo temporal. De igual manera que en los sistemas sensoriales y motores, a excepción del olfatorio, existe un cruce mayor de neuronas e información en las vías ascendentes y descendentes entre el metencéfalo y mesencéfalo (cerebro posterior y medio).

Es importante mencionar que en el hombre tanto el cuerpo como su sistema nervioso está organizado bilateralmente. Sin embargo, esto no se aplica para el lenguaje. En la percepción y generación del lenguaje se encuentran una asimetría en el procesamiento de la información en el sistema nervioso central. La comprensión del lenguaje, en el área descrita por Wernicke, es esencial y necesaria en neurociencia. Las áreas de Broca y Wernicke se encuentran localizadas en el lado izquierdo del cerebro humano. En el área de Wernicke se encuentra la comprensión y en el área de Broca se genera el lenguaje y se produce los comandos necesarios para la pronunciación verbal. Las áreas de Wernicke y Broca están unidas por una vía cortical bidireccional. Estas dos áreas al igual que otras regiones adicionales son parte de una compleja red de trabajo (network) en la neocórtex que contribuye al procesamiento del lenguaje.

El Sistema Nervioso

El sistema nervioso humano contiene aproximadamente 100 mil millones de neuronas. Consiste en el sistema nervioso central (encéfalo y médula espinal) y el sistema nervioso periférico que incluye los nervios vegetativos, sensoriales y motores. El sistema nervioso se organiza en circuitos y sistemas que controlan funciones como la visión, respiración y comportamiento.

La posibilidad de estudiar la biología de la neurona en cultivo y comprender los mecanismos moleculares y genéticos que intervienen en la función neuronal ha permitido desarrollar nuevas estrategias terapéuticas.

¿Por qué necesitamos el Sistema Nervioso?

La concepción evolutiva es central en neurociencia. El sistema nervioso aparece básicamente como una necesidad de los animales de moverse o desplazarse. Para esto es necesario captar las características del medio ambiente, hacer una representación mental adecuada de la realidad exterior e interior y predecir el impacto de las acciones y los acontecimientos externos. El sistema nervioso es anticipatorio y realiza todo el tiempo hipótesis o representaciones sobre el mundo externo.

Objetivos de la neurociencia

Describir la organización y funcionamiento del sistema nervioso, particularmente el cerebro humano.

Determinar como el cerebro se "construye" durante el desarrollo.

Encontrar formas de prevención y cura de enfermedades neurológicas y psiquiátricas

Neurociencia y salud

El mejor conocimiento del cerebro permite comprender y tratar mejor las enfermedades que afectan al sistema nervioso, tanto psiquiátricas como neurológicas. Esto permite nuevos tratamientos mucho más eficientes y seguros para enfermedades de enorme impacto social como Depresión, Demencia, Esquizofrenia, Enfermedad de Parkinson o accidentes cerebrovasculares. Los tratamientos han dejado de ser empíricos y no ocasionan tantos efectos adversos. En los próximos años vamos a asistir a nuevas formas de tratamientos que van a implicar, además de nuevos fármacos, el trasplante de células progenitoras de neuronas o modificadas genéticamente para que cumplan la función de neuronas faltantes y la terapia génica, es decir, la intervención directa en el genoma de las células nerviosas con fines terapéuticos.

Neurociencia, Informática y robótica

La comprensión del sistema nervioso también tiene un interés productivo o industrial. Ejemplo de ello es el diseño de los nuevos aparatos inteligentes, sean computadoras o robots. La inteligencia artificial se basará cada vez más en una emulación de la Biología. El cerebro funciona de una manera radicalmente diferente a como lo hace una

computadora o a un robot actual, los mecanismos por los cuales se procesa la información son inmensamente más complejos y sutiles en los circuitos neuronales. Las neuronas se comunican a través de un alfabeto de sustancias químicas llamadas neurotransmisores. A su vez, las señales no sólo hacen silenciar o activar una neurona sino que también modifican sus propiedades al interactuar indirectamente con los genes. Por ejemplo, un aprendizaje elemental como ser reconocer el peligro frente a la electricidad o el evitar comportamientos con consecuencias negativas (como el dolor o el gusto desagradable) implica millones de eventos moleculares, incluyendo cambios a nivel de la expresión de genes y nuevas conexiones entre las neuronas.

Neuroprótesis como aplicación directa de la Neurociencia

Desde antaño las herramientas fueron aplicadas para la sustitución y compensación de funciones corporales perdidas. Bastones, lentes y dentaduras postizas son las prótesis más comunes. Es posible predecir un rápido desarrollo de las neuroprótesis en las próximas décadas.

Nuestro sistema nervioso recibe señales visuales, auditivas, táctiles olfativas, y gustativas a través de ojos, oídos y receptores especializados localizados en la piel y las mucosas. Comparando dicha información con la almacenada en nuestra memoria somos capaces de actualizar permanentemente nuestra imagen del mundo. Somos capaces de abstraer, definir perfiles de conducta y juzgar. Somos capaces de planificar nuestros movimientos, organizar el patrón de activación de nuestros músculos y controlar su fuerza de contracción. Somos capaces de regular la secreción de hormonas en el momento y cantidad apropiada. No hay computadora actual que pueda emular al cerebro en la variedad y simultaneidad de tareas. Más importante aún, no se sabe si todas las capacidades mentales pueden ser sustituibles por máquinas algorítmicas como las actuales. Sin embargo los avances de la electrónica han permitido construir máquinas que pueden realizar algunas tareas en forma mucho más rápida que el sistema nervioso. Para sustituir o compensar una tarea con una neuroprótesis se requiere que dicha tarea sea claramente definida y separada de otras. Conviene además considerar que la solución brindada por el diseño biológico original ha sido pulida por millones de años de evolución. Por razones técnicas, la detección de señales externas y algunos mecanismos simples de control de la actividad muscular parecen ser los objetivos de las neuroprótesis más probablemente exitosas en un futuro inmediato.

El programa europeo "Levántate y Anda" (SWAM, en sus siglas en inglés) es quizá el estudio sobre neuroimplantes más completo de los llevados a cabo en los últimos años. Este proyecto, desarrollado por el profesor francés Pierre Rabishong de la Universidad de Montpellier, logró el año pasado devolver la capacidad de mover las piernas, en mayor o menor grado, a tres parapléjicos. Mediante un chip implantado en el abdomen que envía señales eléctricas a unos electrodos conectados a los nervios y grupos musculares de las piernas, los distintos sujetos que participaron en el experimento consiguieron mover sus miembros y hasta ponerse en pie. Este microchip, que mide 4 mm de longitud y lleva integrados 10.000 transistores, fue desarrollado por IBM e incluye un software para programar el movimiento, que en un futuro podría ser controlado por el propio usuario desde un simple botón o incluso una especie de completo "bastón de mando".

El sistema, que sólo puede ser utilizado por aquellas personas que conserven su masa muscular en buen estado, fue financiado en sus inicios por la Comisión Europea, pero en la actualidad y al considerar que el proyecto ha entrado en su fase comercial, éste ha dejado de recibir subvenciones públicas para desventura de los más de los 300.000 europeos que padecen estas discapacidades.

Los antecedentes de este sistema de electroestimulación se pueden encontrar en otras aplicaciones ya desarrolladas desde hace años, como la que regula la respiración de los tetrapléjicos, mediante la implantación de electrodos en el diafragma, o la utilizada para regulación de los esfínteres, por ejemplo.

Otro método, aunque no quirúrgico, para aprovechar el potencial eléctrico del cerebro en la mejora de la calidad de vida de algunos enfermos es el ideado por un equipo de investigadores alemanes de la Universidad de Tubinga. Este implante está dirigido a salvar de la incomunicación a los enfermos de ELA (esclerosis lateral amiotrófica) y consiste en la colocación de dos pequeños electrodos en la parte superior de la cabeza del enfermo que registran la actividad de su corteza motora cerebral. Con un cierto entrenamiento los pacientes pueden llegar a escribir directamente con el "pensamiento" en la pantalla de un ordenador, utilizando el movimiento del cursor arriba y abajo para seleccionar las letras deseadas. La técnica resulta algo limitada al basarse en elecciones binarias simples, pero tiene la ventaja de que no necesita cirugía, con los riesgos asociados que ésta conlleva.

Otras aplicaciones de las neuroprótesis se dirigen a la restauración de capacidades sensoriales perdidas, como la vista y el oído. En el primer caso, uno de los experimentos más antiguos para recuperar la visión utilizando la implantación de electrodos en el cerebro es el del "ojo artificial", llevado a cabo por primera vez por el Dr. William Dobbins en 1978, fundador del Dobbins Institute, dedicado hoy a la fabricación y distribución de implantes cerebrales para diversas funciones.

El ingenio en cuestión consiste en unas gafas que llevan incorporados dos dispositivos: una pequeña cámara de televisión y un sensor ultrasónico. Ambos están conectados a un ordenador que el paciente lleva colgado en la cintura y que, una vez procesada la información recibida, transmite a otra máquina la orden de enviar estas señales a unos electrodos de platino implantados en el cerebro, en el cortex visual. Unas recibidas estas señales los electrodos estimulan las células encargadas de percibir destellos de luz, con lo que se produce la visión.

Aunque el sistema no es adecuado para que un ciego recupere la agudeza visual normal, sí sirve para que pueda desenvolverse satisfactoriamente e identifique los objetos. El siguiente paso en esta dirección, y en el que ya se está trabajando, sería la sustitución de la cámara por un dispositivo electrónico más sofisticado, un sistema bioinspirado, con conexiones sin cables (telemetría) y que permita al paciente ver en una pantalla y usar Internet, por ejemplo.

En cuanto a las neuroprótesis utilizadas para la recuperación del oído, los implantes más comunes son las prótesis cocleares, dispositivos electrónicos que sustituyen a las estructuras del oído deterioradas, la cóclea en este caso, encargada de convertir el sonido en un impulso nervioso. Estos implantes, utilizados con éxito en miles de pacientes, se encargan de captar las señales auditivas por un micrófono, convertirlas en

impulsos eléctricos y estimular el nervio auditivo. Este sistema, aunque muy avanzado, tiene un alto coste, requiere de muchos ajustes y pruebas específicas y no es eficaz en todo tipo de pacientes.

Por último, y para ir mucho más lejos en la experimentación, una pareja británica se ha implantado recientemente un chip con el que pretenden comunicarse entre sí sólo con el pensamiento. La pareja, formada por Kevin Warwick, un profesor de cibernética de la Universidad de Reading, y su esposa, persigue la interacción cerebral enfocada al control de movimientos. Para ello, se han hecho implantar un chip de 5 cm conectado a las terminaciones nerviosas del brazo, de tal manera que los impulsos del profesor convertidos en señales de radio se envían a un ordenador y desde éste parten hasta el chip de su pareja, que realizaría exactamente el mismo movimiento. El propio protagonista del experimento sostiene que con esta misma teoría, y a través de un chip, se podría llegar a la transmisión de otro tipo de "impulsos", como sentimientos, deseos y pasiones...

Por el momento, las neuroprótesis abren todo un mundo de posibilidades para aquellas personas que permanecen incomunicadas o incapacitadas a causa de lesiones de su sistema nervioso, ausencia de miembros o deficiencias sensoriales. El desarrollo de nuevas tecnologías, junto al estudio del cerebro permitirán diseñar dispositivos aptos para muy distintos usos, que muy bien pueden comenzar a borrar las fronteras entre el hombre y la máquina.

Neuroprótesis visuales

Las nanotecnologías han conseguido crear y controlar dispositivos de dimensiones nanométricas (millonésimas de milímetro), que con dimensiones similares a la célula, a las proteínas o a las moléculas son capaces de interactuar con ellas en planos de igualdad. Y son los efectos macroscópicos de esta interacción los que están creando nuevas posibilidades y nuevas oportunidades muchas de ellas hoy ni siquiera imaginables.

Un ejemplo actual de ello es la investigación llevada a cabo sobre neuroprótesis visuales, que podrían transformar radicalmente la calidad de vida de los discapacitados visuales en las próximas décadas. Investigadores del Centro Nacional de Microelectrónica del CSIC, de la Universidad Autónoma de Barcelona y de la Universidad Miguel Hernández están trabajando en el desarrollo de neuroprótesis visuales en las cuales elementos como los electrodos de platino, ampliamente utilizados en medicina hasta ahora, serán sustituidos por electrodos de nanotubos de carbono.

Comparativamente, los nanotubos de carbono, que son estructuras nanométricas, ofrecen una mayor biocompatibilidad, producen un menor daño celular y además, por su tamaño permite colocar un número elevadísimo de ellos para estimular las zonas visuales dañadas, pasándose de colocar algunas unidades de electrodos convencionales a centenas o miles de nanotubos. Este cambio tan significativo resuelve uno de los problemas más conocidos en neurofisiología: mejorar la interfase biológico-artificial.

Interfases bi-direccionales

Un paso más adelante consiste no sólo en enviar señales al cerebro humano, para corregir una deficiencia, sino también en extraer información y señales de él, de forma que se pueda interactuar con el cerebro de forma bidireccional.

Un proyecto que se está desarrollando en la Universidad de Southern en California (EE.UU), pretende reemplazar funciones cognitivas perdidas como la memoria, con la implantación de un chip en el hipocampo humano. El proyecto requiere avances en neurociencias, para comprender el comportamiento del hipocampo, y avances en informática, para emular de forma real dicho comportamiento.

Desarrollado el chip, los investigadores persiguen implantarlo en el cerebro humano con lo que se requiere garantizar su perfecto funcionamiento a largo plazo sin provocar daños celulares ni interferir con otras funcionalidades del mismo. Para ello será necesario crear interfases que permitan una interacción directa con las neuronas que lo forman. Mediante técnicas de nanotecnología y el estudio detallado del comportamiento sináptico de las neuronas se podrán diseñar nuevas interfases que superen los actuales problemas de rechazo y que interactúen de forma natural con las neuronas.

Finalmente, y mediante técnicas de ingeniería genética aplicadas a ciertas líneas neuronales, se alterará la expresión genética de las neuronas involucradas en el proceso, permitiendo a estas crear nuevas conexiones que garanticen el aprendizaje, con el fin de conseguir una interacción dinámica y efectiva con el chip implantado.

Algunos ejemplos generales a citar:

Las prótesis cocleares permiten que los sordos vuelvan a oír:

Desde hace varias décadas se trabaja en el desarrollo de sistemas que permitan presentar la información visual o auditiva como un patrón de estímulos sobre la piel. Se registran los sonidos con un micrófono o las imágenes con una cámara de vídeo y se transforma dicha información en un patrón de estímulos eléctricos sobre la superficie de la piel. El paciente aprende a reconocer las "imágenes" creadas de esa forma sobre la superficie de su piel y correlacionar dichas imágenes con los objetos que las provocan. Este tipo de dispositivos se ha empleado con éxito en muchos pacientes sordos, lográndose una mejoría sustancial de la capacidad de comunicación y de la calidad de vida de dichas personas.

En una segunda aproximación los dispositivos electrónicos sustituyen las estructuras dañadas. En el caso de un trastorno auditivo, estos dispositivos, llamados prótesis cocleares, sustituyen a la cóclea (la parte del oído que transforma el sonido en un código de impulsos nerviosos). Las señales son captadas por un micrófono y son transformadas electrónicamente en impulsos eléctricos que estimulan directamente el nervio auditivo. Los resultados han sido muy buenos, existiendo experiencia en miles de pacientes implantados fundamentalmente en Estados Unidos y Europa. Sin embargo, no todos los pacientes sordos pueden ser tratados con la misma eficacia utilizando prótesis cocleares. La selección de pacientes para utilizar dichos implantes involucra una serie de estudios especializados y relativamente costosos. El código de impulsos que representa la información auditiva es aún poco conocido y deben hacerse múltiples pruebas y ajustes de las prótesis cocleares hasta lograr una transferencia óptima de información entre el dispositivo y el nervio. En nuestro país esta tecnología fue introducida con éxito por el grupo del Hospital Maciel, dirigido por el Prof. Dr. Hamlet Suarez.

¿Es posible recuperar los movimientos perdidos?

Las lesiones cerebrales y medulares pueden causar pérdida permanente de las sensaciones o la motricidad de los miembros. En el sistema nervioso, la regeneración de las células afectadas no es posible; por lo tanto los daños son irrecuperables. Sin embargo, la estimulación de elementos sanos puede facilitar el desarrollo de circuitos neurales que realizan la suplencia de las zonas dañadas. En otros casos, la función de las zonas dañadas puede sustituirse parcialmente por una computadora controlada por zonas indemnes del cerebro y por señales obtenidas de los nervios periféricos. Las señales nerviosas pueden ser registradas electrónicamente y procesadas por la neuroprótesis. Una vez procesada la información, el dispositivo puede estimular los músculos con impulsos eléctricos permitiendo cumplir así algunas funciones motoras elementales.

Los dispositivos de que disponemos actualmente han implementado parcialmente este sistema conceptual. Se pueden describir varios tipos entre los que se destacan los dispositivos "de bucle abierto" y "de bucle cerrado".

En los dispositivos llamados "de bucle abierto" se prescinde de las señales neurales resultantes de la contracción de los músculos estimulados. El paciente pone en marcha el estimulador con una llave accionada mecánicamente con un miembro sano o accionado eléctricamente activando voluntariamente músculos sanos. En este último

caso, las señales obtenidas del músculo voluntariamente activado controlan el estimulador. En general, los músculos son estimulados de acuerdo a una secuencia temporal fija. Dicha secuencia se obtiene registrando la actividad muscular en personas normales. Este tipo de dispositivo es poco eficiente porque no tiene en cuenta las características propias del paciente y las distintas condiciones en las cuales el paciente utiliza sus músculos.

En los dispositivos "de bucle cerrado" se gradúa la estimulación de acuerdo al efecto producido. Dicho efecto puede estimarse de distintas formas: (a) utilizando sensores externos que permiten medir continuamente los ángulos entre las articulaciones y la fuerza sobre los puntos de apoyo, (b) registrando la actividad muscular provocada por el estímulo, (c) registrando la actividad de los nervios periféricos sanos que llevan hacia el sistema nervioso la información de la posición articular, el tacto y la presión. En el momento actual sólo se dispone comercialmente del tipo de dispositivos en los cuales los efectos se miden utilizando sensores externos. Los otros tipos de dispositivos "de bucle cerrado" se encuentran aún en etapa experimental.

Por último, existe un tercer tipo de señales importantes para el comando de las neuroprótesis. Estas son las señales generadas por la corteza cerebral; en algunos pacientes estas señales podrían ser registradas en forma continua y ser utilizadas para controlar la computadora que controla la estimulación muscular en combinación con las señales obtenidas de los nervios periféricos (ver figura).

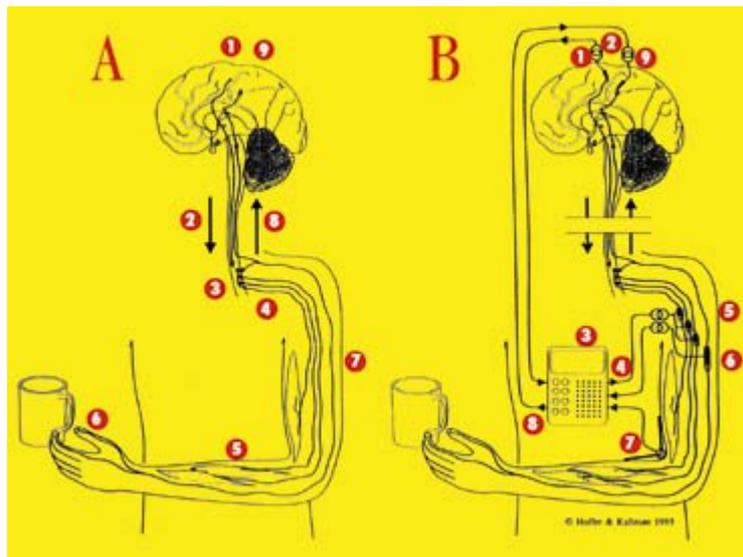


Figura tomada de Hoffer.

A. Las acciones voluntarias son iniciadas en varias áreas cerebrales. Las neuronas motoras de la corteza cerebral (1) proyectan sobre neuronas ubicadas a lo largo de la médula espinal (2) haciendo contactos sinápticos a varios niveles (3). Estas neuronas motoras tienen sus cuerpos en la médula, pero sus prolongaciones se extienden fuera de la misma, formando raíces plexos y nervios que terminan sobre los músculos (5). Señales originadas en terminaciones de nervios sensitivos, incluyendo algunas en las puntas de los dedos (6), se transmiten desde los miembros a la médula y sirven para controlar en forma refleja la excitabilidad de las neuronas que comandan los músculos (7) y para informar al cerebro de los acontecimientos que ocurren en los dedos. La corteza cerebral procesa dicha información (9). Este procesamiento es necesario para adquirir conciencia de lo que ocurre con nuestro cuerpo.

B. Las lesiones de la médula espinal pueden destruir las prolongaciones de las neuronas corticales que comandan los actos motores y las prolongaciones de las neuronas ganglionares y medulares que llevan la

información al cerebro sobre lo que ocurre en los miembros. El diagrama ilustra el plan más optimista concebido como posible al día de hoy. Las señales de la corteza cerebral podrían registrarse (1) y enviarse por telemetría (2) a un computador (3), que está programado para controlar la actividad de los músculos. Este computador envía señales (4) a los músculos para que se contraigan. Estas señales llegan a los músculos por cables implantados o por ondas de radio (5). El computador recibe información tomada de los nervios (6) que inervan la piel y los músculos y de sensores externos (7) que miden el movimiento de las articulaciones. Con estos datos ajusta los estímulos enviados a los músculos para obtener movimientos más suaves y eficaces. Por último el computador envía estímulos (8) por ondas de radio hacia la corteza cerebral (9), para informar al sujeto de lo que está ocurriendo.

Especificando aún más, se ahondará en la ingeniería neuromórfica y la neuroprotesis para personas no videntes.

Introducción general sobre la situación de personas no videntes

La percepción y sus carencias en el desarrollo integral humano

Un concepto fundamental del planteamiento piagetiano es el de movimiento; a partir de esa posibilidad el ser humano puede estructurar su inteligencia; sin embargo, existen hombres que tienen la movilidad restringida por diferentes causas que pueden ser de origen sensorial o físico, tal es el caso de personas ciegas, sordociegas o con parálisis cerebral. Las restricciones en la movilidad generan estados de gran conflicto emocional; a pesar de querer desplazarse, las condiciones de deficiencia motora o sensorial impiden o limitan la satisfacción de ese deseo, con lo cual se afecta tanto la imagen de sí mismo como las oportunidades para estructurar el mundo. Ahora bien, contrario a lo que sucede en personas con parálisis cerebral, la causa para las restricciones en la movilidad de los sujetos ciegos o sordociegos está en la ausencia de visión más que en compromisos del sistema neurológico. La persona ciega, aunque puede caminar, siente inseguridad y temor de desplazarse, con lo cual, además de afectarse su capacidad para establecer relaciones con los objetos, afecta también su capacidad de representación mental del espacio; "la noción de objeto es correlativa a la organización del campo espacial en sí mismo", Piaget. La ausencia de visión y de movimiento limita la acción del sujeto en el medio y las oportunidades de realizar acomodaciones visuales como seguir movimientos de traslación, encontrar la posición de los objetos y evaluar distancias en profundidad; las dificultades de relación con el medio, sumadas a una baja estimulación, de parte de quienes le rodean, tiene efectos negativos en la construcción de conceptos espaciales, lo cual se origina desde la tierna edad por la demora en descubrir la permanencia de los objetos, en diferenciar sus movimientos de los característicos de las cosas y en representar sus propios desplazamientos. Estas son, según Piaget, condiciones básicas para que el hombre pueda construir los conceptos de espacio topológico, proyectivo y euclidiano. Entonces, parte fundamental del proceso de educación o rehabilitación de quienes tienen este tipo de limitaciones de orden motor o sensorial es la promoción de la movilidad y la orientación. Afortunadamente, hoy, desde las tecnologías de apoyo se intenta una mayor comprensión de la fenomenología propia de cada discapacidad para realizar sobre este fundamento el diseño y producción de ayudas compensatorias. Tal es el caso de los sensores para estimular y orientar a la persona ciega o sordociega en sus desplazamientos, o los carros y sillas adaptadas para las personas con parálisis cerebral u otro tipo de problema motor; así mismo lo son las ayudas para fomentar la manipulación del medio o elevar la capacidad comunicativa con sus congéneres. En la actualidad se habla de la movilidad alternativa y esto es ya un avance significativo para entender tanto las implicaciones que ese concepto tiene en la comprensión de la manera como ella puede ser estimulada de acuerdo con las características de cada discapacidad, como sobre la trascendencia de su desarrollo para la constitución del sujeto social, ya que es a través de la movilidad que el hombre puede estructurarse socioafectiva y cognitivamente. Por mucho tiempo, los estudios sobre movilidad en buena medida fueron orientados a la problemática de la persona invidente adulta, siendo su principal objetivo dotarlo de instrumentos y técnicas para movilizarse, más que propender por la investigación sobre la forma como éste, desde sus primeras etapas, construye representaciones del espacio. Las investigaciones sobre la representación espacial en personas invidentes están orientadas a identificar la manera

como esta privación sensorial visual afecta o limita la capacidad para la formación y estructuración de conceptos. En este sentido, vale la pena retomar planteamientos de algunos autores, como Barry y Piaget quienes, respecto de la ceguera, analizan los efectos negativos que tiene para el desarrollo conceptual la deficiente o nula acción sobre los objetos, debido a que si no los toca y explora por medios táctiles difícilmente puede hacer inferencias sobre sus propiedades y establecer relaciones, comparaciones y abstracciones. Pero, además del estudio, en este tipo de población surgen interrogantes respecto de las representaciones del niño con parálisis cerebral o con cualquier otra deficiencia motora; un niño afectado gravemente de parálisis cerebral tiene también dificultades en la representación del espacio debido a los problemas de movilidad y de manipulación; es bien sabida la importancia que tiene la movilidad en todo el proceso de desarrollo humano. Algunos estudios realizados por Fraiberg demuestran cómo el retraso locomotor de chicos invidentes tiene origen en la secuencia de desarrollo mano-oído. Las personas con necesidades especiales de orden motor, visual o visual-auditivo viven en estados de privación sensorial: el ambiente se torna rutinario y así deben pasar largas horas, debido a que el control de éste no depende de ellos sino de quienes les "cuidan", con lo cual se restringen las oportunidades para explorar, tocar, oler, es decir, para encontrar riqueza y variedad de estímulos que les permitan conocer, relacionar y hacer inferencias. En el caso de estas poblaciones, existen menos opciones para el desarrollo de la correspondiente coordinación oído-mano u ojo-mano, vitales para establecer relaciones y conceptos espaciales. Particularmente, en el caso de sujetos ciegos, la perturbación sensorial impide desde el principio la adaptación de los esquemas senso-motores y retrasa su coordinación general; las coordinaciones verbales no bastan para compensar ese retraso siendo necesario todo un aprendizaje de la acción para llegar a la constitución de operaciones comparables a las del vidente, (Piaget).

Niños invidentes cuyo proceso de socialización se ha producido en entornos y contextos culturales pobres han presentado graves dificultades en el seguimiento de instrucciones, además de una marcada tendencia a utilizar expresiones verbales ecológicas y a mostrarse indiferentes tanto a los objetos como a los sonidos provenientes de ellos y al mundo en general. Es decir, si a la deficiencia se le suma el ambiente empobrecido se limita la oportunidad de experimentar con los objetos y, luego, imaginarlos cuando no están presentes; por tanto, se retrasa la capacidad para percibir y para representar. En este sentido, Piaget e Inhelder (1967) plantearon lo importante que resulta el proceso perceptivo para alcanzar el concepto de espacio, concepto que se desarrolla más lentamente que la percepción de espacio. Por otra parte, Ochaita estudia la incidencia de la información que entra por vía táctil o cinestésica en la formación de conceptos espaciales; sus trabajos se soportan en los procesos que debe seguir el ser humano para elaborar conocimiento sobre los espacios topológico, proyectivo y euclidiano; además de estudiar el papel del desarrollo intelectual en estos procesos. Sobre este fundamento, el interés de Ochaita ha sido conocer la forma y las estrategias seguidas por las personas invidentes en la solución de problemas de contenido espacial. Para el análisis de este tipo de problemas ha utilizado pruebas de orientación en niños ciegos respecto de posiciones horizontal, vertical y oblícuas, además del análisis sobre la coordinación de perspectivas y sobre problemas de razonamiento en forma de silogismos lineales, de localización de lugares topográficos y del problema euclidiano de la medida espontánea.

Como resultado de estas experiencias, podemos concluir que los problemas de conocimiento espacial, incluso los proyectivos, son comprendidos y resueltos por los

niños siempre y cuando se les ofrezca la oportunidad de manipular materiales y se les brinde una adecuada información y explicación del problema.

Las ayudas técnicas como puente entre la persona y el entorno

A la hora de buscar una solución para la pérdida de la visión, existe una opción biológica basada en la regeneración de las células afectadas tratándolas con factores de crecimiento, con fármacos, mediante terapia génica, mediante el trasplante celular de fotorreceptores o de epitelio pigmentario. Y una aproximación tecnológica utilizando las ayudas ópticas, las herramientas tiflotecnológicas o las neuroprótesis.

Las neuroprótesis pueden situarse a nivel de la retina, del nervio óptico o de la corteza cerebral para interactuar con las neuronas. Tanto los marcapasos como los trasplantes cocleares son buenos ejemplos de neuroprótesis que ya están funcionando en medicina. Con estas, se sustituye la transmisión de información basada en el intercambio de iones por el de electrones que circulan por un conductor para estimular las neuronas.

Se sabe que la luz, que es una radiación electromagnética, tiene que llegar a la retina para ser transformada en energía eléctrica en sus distintas capas, puesto que la energía eléctrica es la que entiende el cerebro. Cuando las células que promueven esta transformación tienen algún problema, se produce una disminución de la visión. En la actualidad hay distintos equipos que trabajan con prótesis epiretinal, es decir, a nivel de la capa de células ganglionares o bien, con prótesis subretinal, en la capa de los fotorreceptores. Cada una de ellas tiene sus pros y sus contras pero ambas se encuentran con el problema de procurar que se fije en la zona elegida sin que se produzcan desplazamientos o desprendimientos.

Como es lógico, en las zonas donde se ha producido un gran deterioro a nivel celular, carece de sentido intentar estimular las células y por tanto hay que estudiar dónde puede ser más útil la prótesis, bien en el nervio óptico o bien en la corteza cerebral.

Una vez tomada la decisión, es necesario estimular el cerebro de una forma lo más parecida a como lo hace el ojo, es decir, enviar y procesar la información de una manera que la corteza cerebral pueda entender.

La información llega a la corteza cerebral aproximadamente a 1.5mm. por debajo de la superficie lo cual complica el abordaje quirúrgico por lo que se utilizan prótesis cuyos electrodos tengan unas puntas que penetren hasta la zona deseada.

En cualquier caso, nunca se está hablando de conseguir una visión normal, sino una visión con un campo reducido, sin matices y sin colores, sin embargo, esto ya proporciona un gran paso en la calidad de vida del invidente.

El desarrollo de las neuroprótesis se asientan sobre ciertas certezas a saber:

- Se cree que estas prótesis pueden funcionar porque ya lo hacen con otros sentidos y porque la mayoría de las enfermedades afectan sólo a lo que es el globo ocular.
- Se sabe que la estimulación eléctrica o mecánica de las neuronas del ojo producen destellos de luz.
- Utilizando distintos electrodos se puede llegar a simular patrones complejos ya que cada uno produce un punto de luz.
- En cualquier caso, después del implante se requerirá un proceso de aprendizaje que puede ser muy variable.
- Lo importante no es transmitir mucha información a los centros de la visión, sino que esta sea útil.

El primer paso es conocer cómo se trasmite y cómo se procesa la información, en definitiva, cómo se desempeña el hecho visual. En ocasiones, las células reaccionan igual ante estímulos muy distintos y en otras, ocurre exactamente lo contrario, ante un mismo estímulo, reaccionan de manera distinta. Se hace necesario pues, saber cómo reconoce el cerebro lo que está viendo. Los últimos estudios llevan a pensar que el cerebro procesa el global de los estímulos recibidos y no uno a uno.

Hoy por hoy se está consiguiendo que la respuesta de la retina artificial sea similar a una retina humana y aunque la visión conseguida es en blanco y negro, se puede adaptar a las necesidades del paciente intensificando distintas características de la imagen.

Los problemas que están surgiendo se pueden enumerar:

- No se sabe cuántos electrodos son necesarios para una visión útil, cuál ha de ser su separación ni tampoco la corriente necesaria para evocar una determinada percepción visual.
- Si la matriz implantada es muy grande, dado que el cerebro no es plano y la matriz es rígida, se presentan problemas de adaptación por eso se tiende a poner varias más pequeñas. Ya se han obtenido prótesis de 100 electrodos de 3.5x3.5mm.
- Dado que la técnica de implante es invasiva, se pueden presentar problemas de infección.
- Se sabe que en torno a un 5 o 6% de los electrodos se deterioran como consecuencia de que atraviesan capilares sanguíneos y entonces se produce una respuesta inmune por eso se están desarrollando materiales inertes.
- Mandar la información a través de cables externos supone un riesgo de infección por lo que se está probando la telemetría como método para evitar esta contingencia.

A parte de todo lo visto anteriormente, se ha constatado que cuando se pierde la vista, la zona del cerebro encargada de la visión no permanece inactiva, sino que asume otras funciones y en tal caso, no tendría mucho sentido colocar una prótesis en una zona del cerebro que ya esté ejerciendo unas funciones distintas a la de la vista. Lo que está claro es que con la pérdida de la visión, la parte del cerebro encargada de esta no se atrofia.

Las tecnologías de apoyo se convierten en mediadoras entre el ambiente y la persona en cuanto que sirven para estimular desde la infancia procesos básicos de movilidad, de manipulación, de orientación y de comunicación. Bower (1977) estimuló mediante la guía sónica la tendencia en los bebés para alcanzar objetos; las ondas emitidas por el dispositivo les permitieron aprender a interpretar los ecos reflejados y deducir la presencia de juguetes, su distancia y tamaño. Ello deja ver la importancia que adquiere el sonido para los bebés invidentes puesto que sólo a través de él pueden identificar los objetos e incentivarse por el movimiento. De acuerdo con Lewis, debe proporcionárseles opciones de tipo auditivo y táctil con lo cual logran mejorar la capacidad de almacenamiento e integración de la información; de hecho, es más complejo el proceso de representación puesto que al "no ver" a través del sentido de la vista las construcciones que hacen son más difíciles de elaborar con respecto a sus características físicas. Además, se complican en el establecimiento de las relaciones entre la realidad real y la realidad virtual, producto de su imaginación y fantasía. Los estudios de Lowenfeld y Happman demuestran la importancia de que los niños invidentes exploren entornos concretos y se les estimule en el desarrollo de conceptos básicos como distancia, dirección y cambios ambientales. Sin embargo, las

observaciones hechas por Fraiberg y Adelson dejan ver la poca motivación de los niños ciegos para desplazarse o moverse en el espacio debido a la falta de estímulos visuales, por lo que debe ser fomentada la capacidad de movimientos auto-iniciados con lo cual logran descubrir fuentes sonoras y desarrollar a través de todo un complejo proceso el "sentido de obstáculo", es decir la capacidad de diferenciar las variaciones que sufre el sonido al chocar con los objetos que encuentra en el medio ambiente.

Problemas de la percepción asistida para orientación y movilidad

Se ha visto cómo las deficiencias perceptivas limitan no solo el mundo de las acciones inmediatas sino también y de un modo determinante el desarrollo humano en su más amplio sentido. Por este motivo la percepción asistida, esto es, utilizando ayudas técnicas, tendrá una mayor potencialidad si se incorpora en la infancia a las actividades diarias, pudiendo así el niño desarrollar, tal como se ha comentado, sus propios mecanismos de estructuración de la información y su correlación con el entorno. De la amplia problemática que plantea este tema, hay trabajos que se han centrado principalmente en los problemas directamente relacionados con la locomoción, especialmente de la población ciega. La locomoción, que se podría asimilar a un término más amplio como navegación, comprende básicamente los conceptos de orientación y movilidad, incluyendo aspectos de locomoción en sí mismos, relacionados con el propio movimiento, y sobre todo de percepción. Matizando las definiciones de Foulke, la movilidad se centra en la realización de movimientos través del entorno que posibiliten el logro de un objetivo determinado, mientras que la orientación supone el conocimiento suficiente y en cada momento de la posición espacial de la persona respecto al objetivo para que este pueda ser alcanzado. Estas dos actividades plantean dos formas complementarias de actuación. La primera de ellas es de tipo local y relativo en el sentido de considerar los problemas de irregularidades o accidentes de suelo y obstáculos para ejecutar los movimientos inmediatos; la segunda, de carácter global y más absoluto, trata de la definición de trayectorias con la selección de caminos evaluando factores como distancia y seguridad. Las acciones de percepción son de primera importancia al ser por las que la persona adquiere el conocimiento del entorno en sus distintas facetas. La visión en este sentido tiene un papel preponderante, aunque es preciso considerar la percepción natural como un proceso integrado por el que en este caso, tal como se ha apuntado con anterioridad, intervienen también otros estímulos sensoriales a través del sentido vestibular, de sensaciones ligadas al movimiento (balanceo, deslizamiento, aceleración, etc.) y del cinestésico, de carácter propioceptivo.

Los sistemas sensoriales nacen como ayudas técnicas a la percepción natural. En este sentido nos referimos a la percepción asistida y en general a la percepción artificial que abarca las siguientes fases: captación de información y excitación previa en su caso, conformación y depuración, extracción de características, interpretación y comunicación. Las etapas intermedias constituyen el procesamiento de la información adquirida para su presentación final. Ello se realiza mediante los modelos previamente definidos tanto de los objetos del entorno a identificar como de las tareas a realizar, ejecutándose en computadores, DSP o similares. Los problemas más arduos son sin duda los relacionados con el mundo exterior, esto es, los de captación y comunicación.

En lo referente a la comunicación se están empleando canales que utilizan las capacidades sensoriales alternativas. En este sentido, sin embargo, la visión sobre todo

presenta grandes problemas de emulación particularmente en los aspectos de representación física de la información captada por medios artificiales (cámaras CCD, láser...). En efecto, dada la alta densidad de datos adquiridos y la estructura espacial de los mismos es muy difícil formalizar una representación por canales de naturaleza esencialmente serie como es el auditivo, muy simple por otra parte de excitar por medios acústicos. Otras vías alternativas se están investigando, destacando entre ellas los llamados sistemas sustitutorios de la visión ya sean por estimulación electrodérmica SESV (Smith Kettlewell) o táctil TVSS (Bach y Rita, Palacz, Kurcz, Craig, Collins, Gibson) en los que se emplean dispositivos matriciales de representación asociados a técnicas concentración y partición de la información tales como TDM (multiplexado por división temporal). Finalmente, en la actualidad se desarrollan también dispositivos descriptores que, partiendo de la información captada por cámaras de visión generan información verbal del contenido de la escena usando como interfases sintetizadores de voz (Deering). No obstante, el estado actual de la técnica presenta importantes problemas para la consecución de sistemas de alta densidad de información por las limitaciones en cuanto a portabilidad, dinámica de detección, requerimientos energéticos así como de fiabilidad en los mismos. En el aspecto de captación se han elaborado numerosos sistemas relacionados con la orientación y la movilidad, pudiendo distinguir dos tipos de enfoques según el ámbito de captación: locales y globales. Los primeros, detectores de obstáculos (clear path indicators) se ciñen a un medio muy próximo estando más relacionados con los problemas de movilidad. Los segundos o de entorno afectan más directamente a aspectos de orientación, estableciendo posibles trayectorias hacia el objetivo. En el primer caso estarían los sistemas basados en ultrasonidos o láser, de corto alcance y haz estrecho (Mowat Sensor, Nottingham Obstacle Detector, Single Object Detector, Laser Cane...), mientras que al segundo grupo pertenecen otros de captación más amplia usando desde US, como el Pathsounder, hasta los sistemas GPS de localización absoluta por satélite y de compás magnético con mapeados de la zona de interés. A pesar de todos estos esfuerzos un número muy bajo (inferior al 25 %) incluso de la población privilegiada que ha podido ser entrenada con alguno de estos dispositivos lo utiliza al menos ocasionalmente (Blasch y Long).

Introducción a la Ingeniería Neuromórfica

La Ingeniería Neuromórfica es un campo de investigación que trata del diseño de sistemas artificiales de computación que utilizan propiedades físicas, estructuras o representaciones de la información basadas en el sistema nervioso biológico. Aunque otros campos, como el de las Redes Neuronales Artificiales, también se inspiran en la biología, lo que caracteriza a la Ingeniería Neuromórfica es la emulación de funciones muy específicas, usualmente de tipo sensorial, cuya estructura y funcionalidad biológica han sido estudiadas con gran detalle, dando lugar así a la construcción de sistemas tales como retinas y cócleas artificiales.

Carver Mead, proponente de la denominación Ingeniería Neuromórfica, comentó en 1993: *Como ingenieros, sería necio ignorar las lecciones de miles de millones de años de evolución.*

De hecho, los sistemas biológicos tienen habilidades como el reconocimiento del habla, segmentación de la información visual, control del movimiento autónomo en entornos cambiantes, etc.; que se desarrollan con una eficiencia fuera del alcance de los sistemas artificiales convencionales. Uno de los numerosos ejemplos lo constituye la audición, que se efectúa con un extraordinario rango dinámico (más de 100db) a partir de sensores de muy baja calidad (rango dinámico menor de 20db). Los avances obtenidos en nuestro conocimiento acerca de la forma en que los sistemas biológicos evolucionan y se adaptan, y cómo el sistema nervioso central codifica, memoriza, aprende y procesa información deben ser una motivación para la implementación de futuros sistemas bioinspirados.

Por ejemplo, las siguientes características de los sistemas nerviosos naturales serían de utilidad si se pudieran adoptar en sistemas artificiales:

- *Procesamiento paralelo o procesamiento neuronal*: sin duda muchas de las asombrosas propiedades de los sistemas naturales son debidas a que son sistemas de computación colectivos. La implementación de sistemas con un gran paralelismo no es una tarea fácil. El diseño de primitivas de computación sencillas (neuronas artificiales) capaces de realizar un procesamiento eficiente mediante una topología adecuada es un tema en el que una amplia comunidad científica ha investigado durante años.
- *Computación cooperativa*: el modo en que los sistemas biológicos realizan procesamientos robustos y de precisión basándose en unidades (neuronas) de computación imprecisa y estocástica, con gran nivel de ruido y respuestas impredecibles frente a estímulos similares, constituye una característica de gran interés para la implementación de sistemas artificiales.
- *Capacidad de auto-configuración*: esta característica presente en los sistemas biológicos es de gran utilidad para adaptar sistemas de computación genéricos a distintas funciones. Además esta propiedad aumenta la efectividad de los sistemas a entornos específicos de cada individuo y permite la adaptación a nuevas condiciones durante su tiempo de vida.

Por otro lado existen cualidades de los circuitos electrónicos de las que carecen los sistemas biológicos, por ejemplo:

- *Gran ancho de banda y esquemas de comunicación con multiplexación temporal:* La utilización de esquemas de multiplexación que no limiten el paralelismo puede ayudar a superar el problema de la reducida (comparada con la biología) capacidad de interconexión física entre elementos computacionales.
- *Sensores remotos:* Existen multitud de sensores y formas de comunicación que permiten su utilización remota. Este tipo de dispositivos ofrecen la posibilidad de implementar sistemas de procesamiento distribuidos.
- *Actuadores remotos:* al igual que los sensores, estos dispositivos permiten el control remoto de sistemas.
- *Procesamiento de gran precisión:* para ciertas tareas puede ser necesaria una gran precisión de cálculo. Esto es fácil de realizar con primitivas de computación convencionales basadas en unidades aritmético-lógicas digitales de la precisión que se requiera.

En la actualidad investigadores del Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada participan en el desarrollo de Tres proyectos europeos relacionados con la implementación de primitivas de computación del campo de la Ingeniería Neuromórfica mediante hardware reconfigurable. Los proyectos son:

CORTIVIS: Cortical Visual Neuroprosthesis for the blind

ECOVISION: Artificial Vision System based on early cognitive cortical processing

SpikeFORCE

A. CORTIVIS: Cortical Visual Neuroprosthesis for the blind

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de prototipos en el campo de la rehabilitación visual. En concreto se pretende estudiar la viabilidad de neuroprótesis implantadas en el cortex visual primario para lograr una visión, que aunque limitada, es de sumo interés para personas ciegas. Los resultados de este proyecto pretenden generar información sobre este tipo de dispositivos no disponibles actualmente. Además, se recogerá información sobre la plasticidad del sistema nervioso visual de adultos, que será fundamental para el desarrollo de dispositivos de rehabilitación visual y de sistemas de entrenamiento.

Dentro de este contexto se pretende desarrollar una plataforma de procesamiento visual en tiempo real que genere una salida bio-compatibile. Esto es, se pretende que el sistema de procesamiento genere impulsos que puedan estimular de forma eficiente el cortex visual.

Ello implica realizar investigaciones en distintos campos con objeto de identificar la codificación óptima para este tipo de dispositivos y el nivel de adaptación que se puede esperar de pacientes implantados, es decir, el nivel de plasticidad del cortex visual para la utilización de esta nueva fuente sensorial. El sistema de procesamiento, basado en hardware de tipo FPGA, deberá emular el tracto visual desde la retina hasta el cortex visual, teniendo en cuenta que el número de conexiones final que es muy limitado comparado con las que contiene el nervio óptico.

La facultad de reconfiguración es especialmente relevante en este caso dado que cada paciente puede requerir distintas especificaciones de codificación y proyección de la información visual sobre los microelectrodos de estimulación. Además estas

especificaciones deben de determinarse mediante experimentación, ensayando distintas configuraciones del hardware de procesamiento visual.

B. ECOVISION: Artificial Vision System based on early cognitive cortical processing

Los dispositivos de visión artificial ideados por el hombre están lejos de conseguir la eficiencia y exactitud en el análisis de escenas visuales encontrada en animales vertebrados. El objetivo de ECOVISION es utilizar el conocimiento del modo de funcionamiento de sistemas biológicos de visión para construir un sistema híbrido hardware-software de visión con propiedades precognitivas. Los sistemas precognitivos utilizan conocimiento implícito del mundo. Para ello el consorcio ECOVISION (formado por 7 miembros de 5 países incluyendo una empresa) con experiencia en diseño de circuitos VLSI, visión artificial, neurociencia y psicología pretende desarrollar una arquitectura de procesamiento distribuida para análisis visual adaptativo con capacidad de utilización de información precognitiva.

En concreto, el papel del hardware reconfigurable en el área de visión artificial adquiere especial importancia por su capacidad de poder procesar imágenes en tiempo real. Por ello, en el campo de la implementación de front-ends para sistemas de procesamiento de más alto nivel constituye una alternativa muy válida, capaz de generar información pre-procesada. En el ámbito de ECOVISION se pretende estudiar la implementación de un sistema de extracción de flujo óptico (información de movimiento) y de estereo (para la localización en el espacio basado en discrepancias entre imágenes desde distintas perspectivas). El proyecto tiene como campo de aplicación primario el mundo automovilístico en donde se prevé que la visión artificial constituirá una opción válida en unos 10 años. Actualmente se trabaja definiendo una aplicación de monitorización de adelantamientos basada en un esquema de visión artificial en tiempo real.

La visión es probablemente el principal sentido del ser humano, como lo sugiere el hecho de que aproximadamente el 40% de toda la información que llega al cerebro está relacionada con el sistema visual. Entre las posibles causas del fallo de este sistema, se encuentran el daño o la degeneración a nivel de: 1) los medios transparentes del globo ocular (como las cataratas y opacidades corneales), 2) la retina (la fina capa de tejido neural que se encuentra en la parte interna del globo ocular), 3) el nervio óptico o 4) el cerebro. Aunque durante milenios la posibilidad de tratar estas causas y, por tanto, restablecer la visión se ha visto como un milagro, los actuales avances en Medicina, Genética, Inmunología, Fisiología, Óptica, Cibernética e Ingeniería permiten que se puedan empezar a ensayar diversos tratamientos que, aunque todavía están en una fase clínico-experimental muy preliminar, eran impensables hasta hace muy pocos años.

Uno de estos tratamientos implica el uso de Prótesis o Implantes especialmente diseñados para interaccionar con el tejido nervioso. Estas Neuroprótesis no son más que dispositivos electrónicos capaces de intercambiar información con los propios circuitos neuronales. Aunque dicho de esta forma puede parecer que estamos hablando de ciencia-ficción, hay que tener en cuenta que esto es exactamente lo que hacen los marcapasos (que se utilizan desde hace ya más de 20 años), las prótesis auditivas o las modernas neuroprótesis que se están empezando a utilizar en el tratamiento del dolor crónico, de la Enfermedad de Parkinson y en algunos tipos de Epilepsia.

Las degeneraciones retinianas (como la retinosis pigmentaria o la degeneración macular) ocasionan una importante proporción de cegueras intratables, por lo que varios laboratorios en distintas partes del mundo están trabajando actualmente en el desarrollo de neuroprótesis a nivel de la retina para el tratamiento de estas patologías (Chow and Chow, 1997, Humayun et al., 1999, Zrenner et al., 1999). Aunque esta aproximación puede ser eficaz, en muchos casos existe una importante afectación de todas las capas de la retina, por lo que su utilidad puede verse seriamente comprometida. Además las neuroprótesis retinianas no permiten el tratamiento de cegueras cuya patología afecte a las células ganglionares de la retina o las vías visuales extraoculares. Una posible alternativa, en la que se está trabajando desde hace unos años en colaboración con el grupo del Profesor Normann de la Universidad de Utah, es la implantación de una neuroprótesis a nivel de la parte del cerebro que se encarga de procesar la información visual. Esta idea se basa en el hallazgo de que la estimulación eléctrica a nivel de la corteza occipital desencadena la percepción subjetiva de destellos de luz denominados técnicamente fosfenos.

C. SpikeFORCE: Real-Time Spiking Neurons for Robot Control El consorcio SpikeFORCE está formado por una empresa con interés en robótica (Sony) y las universidades de Paris (ENS), Pavia (INFM-RUPV) y Granada.

El diseño de robots está adquiriendo un interés cada vez más importante en la sociedad europea. Pero, a pesar de los avances tecnológicos, los robots actuales no son capaces de realizar algunas tareas de procesamiento sencillas similares a las que realiza cualquier mamífero.

Así, el aprendizaje continuo en tiempo real sigue constituyendo un problema. Para obtener habilidades de movimiento similares a las de los animales, la información de percepción y acción, de gran número de señales de sensores, motores y señales cognitivas debe ser integrada como un todo. El consorcio multidisciplinar SpikeFORCE, integrado por físicos, expertos en neurociencia, e ingenieros electrónicos e informáticos, investiga los mecanismos de integración de información en el cerebro y su posible implementación en forma de circuitos en robots. El estudio de estructuras basadas en pulsos, como las que forman las neuronas biológicas, puede aportar nuevas ideas en este sentido.

Para todo ello los colaboradores de los centros Ecole Normal Supérieure y Universidad de Pavia trabajan en modelos neuronales basados en pulsos. Nuestro grupo en la Universidad de Granada estudia el modo de implementación de estos modelos mediante circuitos de forma que puedan funcionar en tiempo real. Por otra parte, la empresa Sony France, investigará su aplicación en plataformas de robot en desarrollo como el perro Aibo y el humanoide.

Concretamente, se estudian formas de implementar las primitivas de adaptación y aprendizaje de movimientos coordinados que tienen lugar en el cerebelo de los mamíferos. Este tipo de aprendizaje es el que adapta de forma continua el ciclo cerrado acción-percepción.

Para ello es necesario integrar de forma no destructiva señales sensoriales, motoras y cognitivas en tiempo real.

El cerebelo tiene la habilidad de integrar información de un gran número de fuentes heterogéneas y es capaz de un aprendizaje extremadamente sensible al contexto general en el que se desarrolla cada acción. De hecho, en el área de control de robots, éstas son dos características importantes que representan campos de investigación abiertos: la integración de información de diferentes fuentes (percepción multi-modal) y el aprendizaje continuo de acciones eficientes.

La discriminación de entradas muy similares es necesaria para el perfeccionamiento de movimientos de precisión, en tanto en cuanto pequeñas diferencias, a pesar de grandes similitudes entre las entradas, adquieren una importancia crucial para este proceso de refinamiento. Los axones de muchas células granulares (100 millones en la rata) constituyen el canal de entrada al cerebelo llevando información sensorial, propioceptiva y contextual a las principales células de cortex del cerebelo, las células de Purkinje (300.000 en la rata), que generan la única salida del sistema. Cada célula de Purkinje recibe unas 200.000 entradas diferentes (para ello existen unos 60 miles de millones de sinapsis de este tipo en la rata). Actualmente se cree que las modificaciones en las sinapsis de conexión entre las células granulares y las de Purkinje almacenan la información adquirida durante el aprendizaje motor, permitiendo la asociación entre una salida motora correcta y una entrada particular.

Para todo ello, se estudiarán las ventajas e inconvenientes de esquemas de computación basados en pulsos para la integración y discriminación de señales.

En el área de control de robots este tipo de estructuras puede tener importancia si se puede utilizar la dimensión temporal de forma eficiente como recurso de computación, ya que el objetivo es generar acciones motoras correlacionadas en el tiempo entre ellas y con las señales de entrada.

Dos son las líneas de investigación de este proyecto relacionadas con el Hardware reconfigurable:

- Implementación de modelos neuronales basados en pulsos en plataformas de tipo FPGA. Estas implementaciones servirán para posibilitar la simulación de sistemas neuronales de grandes dimensiones basados en pulsos.
- Evaluar la posibilidad de implementación de sistemas de control de robots basados en computación por pulsos mediante circuitos neuronales específicos.

PRÓTESIS DE RETINA INTRAOCULAR

La prótesis retinal MARC ("Multiple-Unit Artificial Retina Chipset") puede beneficiar a las personas visualmente afectadas. El aparato rehabilitador reemplaza la funcionalidad de los fotorreceptores defectuosos o inactivos dentro de los pacientes que sufren de Retinitis Pigmentosa (RP) o Degeneración Macular por envejecimiento (ADM). Los componentes que caracterizan el sistema MARC son los siguientes: una video cámara extra-ocular, un chip procesador de video, un generador de radiofrecuencias (RF) y una bobina primaria, una bobina secundaria (generalmente intraocular), un rectificador y regulador, un procesador MARC, chips desmultiplexores, y finalmente un arreglo o matriz de electrodos.

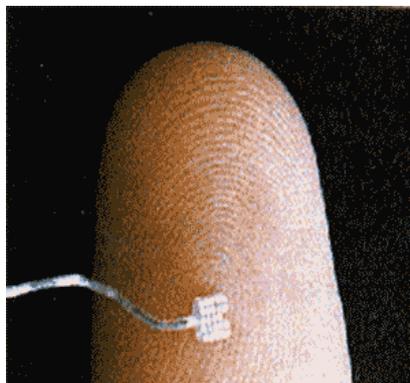
La fabricación y prueba de la primera generación de chips MARC ya está siendo realizada. Una síntesis de los avances en la ingeniería, la biología, la medicina y la física es ofrecida dentro de la presentación de los métodos y significados de todo el diseño de ingeniería, alimentación, adherencia, y revestimiento de las prótesis retinales de MARC.

Una serie de estudios biológicos y clínicos acerca de la estimulación de las neuronas de la retina han tenido implicaciones que han afectado el diseño de los electrodos.

MARC fue diseñado para proveer de visión útil a más de 10 millones de personas que sufren de ceguera porque han perdido los fotorreceptores, o parte de ellos, debido a la degeneración parcial por enfermedades tales como la Degeneración Macular por envejecimiento (ADM) o la Retinitis Pigmentosa (RP).

Las prótesis retinales están basadas en el concepto fundamental de reemplazar la función de los fotorreceptores con aparatos electrónicos, esta iniciativa ha sido desarrollada por el Dr. Mark S. Humayun. Una discreta percepción fue reproducida en catorce de quince pacientes de prueba, trece con Retinitis Pigmentosa (RP) y dos en la última etapa de Degeneración Macular por envejecimiento (ADM).

Patrones eléctricos de estimulación de la retina fueron probados en dos pacientes. El primer paciente fue capaz de percibir un patrón de electrodos en forma de 'U' como una 'H'. El segundo paciente identificó correctamente un patrón de electrodos en cuadrado como una "caja". Construyendo sobre tales resultados médicos, el Dr. Humayun y su equipo de doctores, físicos, e ingenieros han trabajado hacia el desarrollo del prototipo de MARC.



El tamaño del dispositivo

CONSIDERACIONES PREVIAS DE BIOCOMPATIBILIDAD

La biocompatibilidad con los tejidos es lo más importante para cualquier dispositivo a implantar. El implante debe ser construido e implantado de una manera tal que no haga daño al tejido, pero también debe asegurarse al mismo, e igualmente debe asegurarse que podrá funcionar por décadas. En el caso de una prótesis retinal electrónica existen consideraciones mecánicas y eléctricas.

Infecciones.

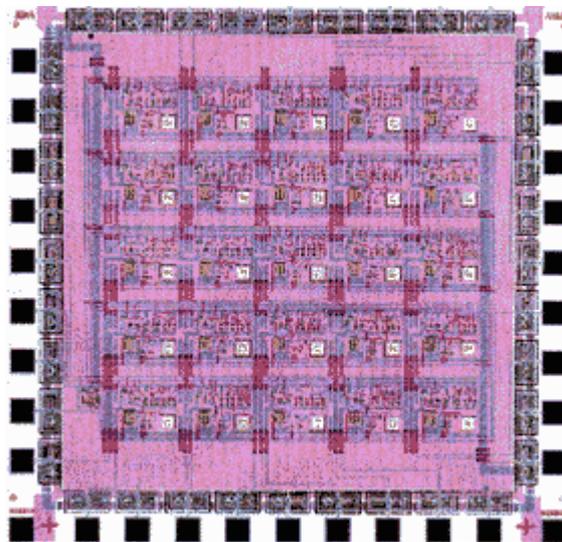
A pesar del hecho de que el ojo ha sido considerado como un lugar privilegiado inmunológicamente hablando y que por esto las infecciones son frecuentemente eliminadas por él mismo. El curso de una inflamación es idéntico al que ocurre en cualquier parte del cuerpo una vez que la inflamación ha ocurrido. La mera manipulación quirúrgica, así como una infección, biodegradación o enfermedad por sustancias tóxicas, podrían, en principio, provocar la respuesta inflamatoria. Pero es más frecuente que ocurran infecciones debido a otros lugares del cuerpo infectados, como la piel, que debido a implantes infectados, cirugías o al equipo médico, por lo que no es necesario consideraciones más especiales que las regulares.

Adherencia.

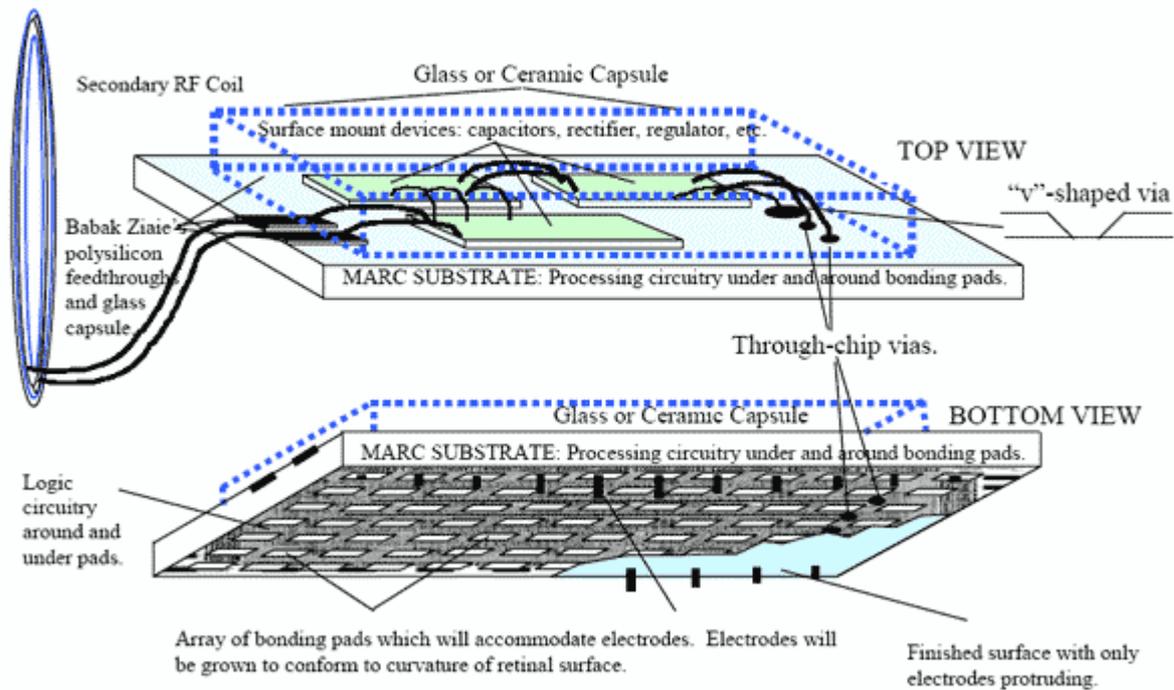
Un implante electrónico será expuesto a movimientos, por lo que debe estar adherido de una manera estable. En particular, la prótesis epiretinal será expuesta a continuos movimientos provocados por la rotación ocular, estos movimientos pueden alcanzar velocidades de 700 grados por segundo. Los métodos de adherencia difieren según los diferentes avances y diferentes localizaciones de los implantes. El lugar preferible para la fijación es la corteza de los tejidos, y no el hueso debido al movimiento constante del cerebro en relación al mismo. Bio-pegamentos, micro-clavos, e inserciones entre las capas retinales han sido, y están siendo, estudiadas.

Revestimiento de los Dispositivos.

Todas las prótesis visuales consisten en varios dispositivos electrónicos. Los elementos de los implantes deben ser sellados herméticamente para evitar que sean afectados por los fluidos biológicos corrosivos. Vidrios, cerámicas y hasta Titanio son algunos de los elementos que pueden ser utilizados.



Dispositivo



Esquema base del dispositivo

FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE MARC

Los fotorreceptores de una retina saludable, inician una señal neural en respuesta a la luz.

Esta señal neural es procesada por las células bipolares y por las células de “ganglion” antes de ser enviadas a través de la superficie de la retina hacia el nervio óptico. Los fotorreceptores son casi completamente ausentes en la etapa final de los pacientes con Retinitis Pigmentosa (RP) o Degeneración Macular por envejecimiento (ADM), mientras que las células bipolares y las células de “ganglion”, por medio de las cuales los fotorreceptores “transmiten”, sobreviven altas tasas de tiempo. Las células bipolares y las células de “ganglion” permanecen intactas, y debido a la anatomía de la retina, ellas están en una posición donde pueden responder a la estimulación eléctrica. Los dispositivos fotónicos de silicio (que responden ante las radiaciones electromagnéticas) pueden ser fabricados para responder solo al espectro visible, y los electrodos pueden ser diseñados para estimular las células nerviosas. Así la tarea básica para la creación de una prótesis retinal es ingeniar un dispositivo que funcione como una interfaz artificial, que pueda traducir una imagen en impulsos eléctricos que por medio de los electrodos estimulen las neuronas operativas. En la Figura 1 puede apreciarse un diagrama básico de la prótesis retinal MARC.

En el sistema de MARC ("Multiple-Unit Artificial Retina Chipset"), los componentes implantados en el ojo (mostrados en la Figura 2), consisten en una bobina secundaria receptora colocada bastante próxima a la córnea, un “traseiver” (transmisor / receptor), un chip procesador, un manejador de la corriente para la estimulación, y un arreglo o matriz de electrodos fabricados en un material como el silicio con finos cables planos conectando los dispositivos.

El arreglo de electrodos (cuyo reducido tamaño puede ser observado en la Figura 4), es implantado en la retina, mientras el chip procesador de las señales es colocado más próximo a la córnea. Una cámara miniatura CMOS (“Complementary Metal Polisilicio Oxide Semiconductor”) de bajo consumo de potencia puede ser colocada en unas lentes externas, esta cámara tomará las imágenes visuales y las transmitirá a los dispositivos intraoculares implantados por medio de una telemetría con radiofrecuencia (RF), dicha telemetría es la que hace uso de ambas bobinas (trasmisora y receptora).

La prótesis intraocular decodifica la señal y estimula eléctricamente a las neuronas de la retina a través del arreglo de electrodos y en una manera que corresponda con la imagen adquirida por la cámara CMOS.

Debido al tamaño de la cavidad intraocular, la delicadez de los tejidos, el espesor de la retina (100-300 μ m), y al hecho de que el ojo es móvil, un implante retinal representa grandes desafíos tecnológicos para la ciencia. Desde hace muchos años estos factores han sido tomados en consideración por los ingenieros investigadores fabricantes de los dispositivos del implante retinal MARC. Motivados por los resultados de las pruebas clínicas y de ingeniería se realizaron muchos esfuerzos para producir un prototipo apto para ser implantado en la retina humana. Estos esfuerzos llevaron a los siguientes resultados:

- 1) Pruebas en voluntarios con ceguera han demostrado que la estimulación eléctrica controlada de las neuronas retinales aún funcionales, haciendo uso de un arreglo de electrodos, generan resultados compatible con movilidad y reconocimiento de letras.
- 2) Pruebas preliminares de biocompatibilidad en animales desarrolladas por investigadores en la universidad “Johns Hopkins University” han mostrado que el ojo puede tolerar los materiales propuestos, así como también las implantaciones quirúrgicas.
- 3) Existe la electrónica para la transmisión de potencia y datos usando tecnología de telemetría por RF (radiofrecuencias).
- 4) La tecnología estándar de los semiconductores pudo ser usada para fabricar un chip receptor, el cual podría manejar la corriente a través de un arreglo de electrodos y estimular las neuronas retinales.
- 5) Las primeras generaciones de MARC han sido diseñadas, fabricadas y probadas en la universidad de “North Carolina State University”.

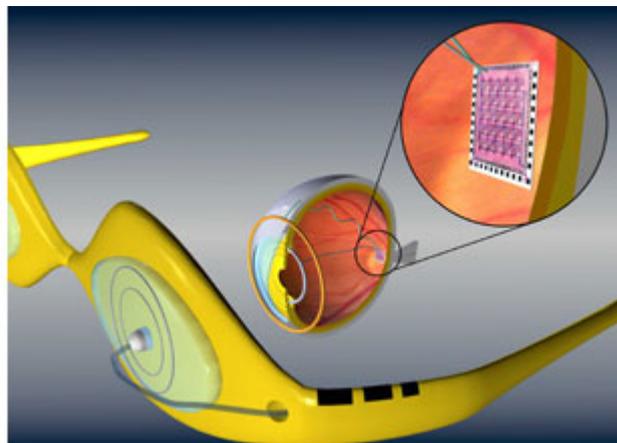
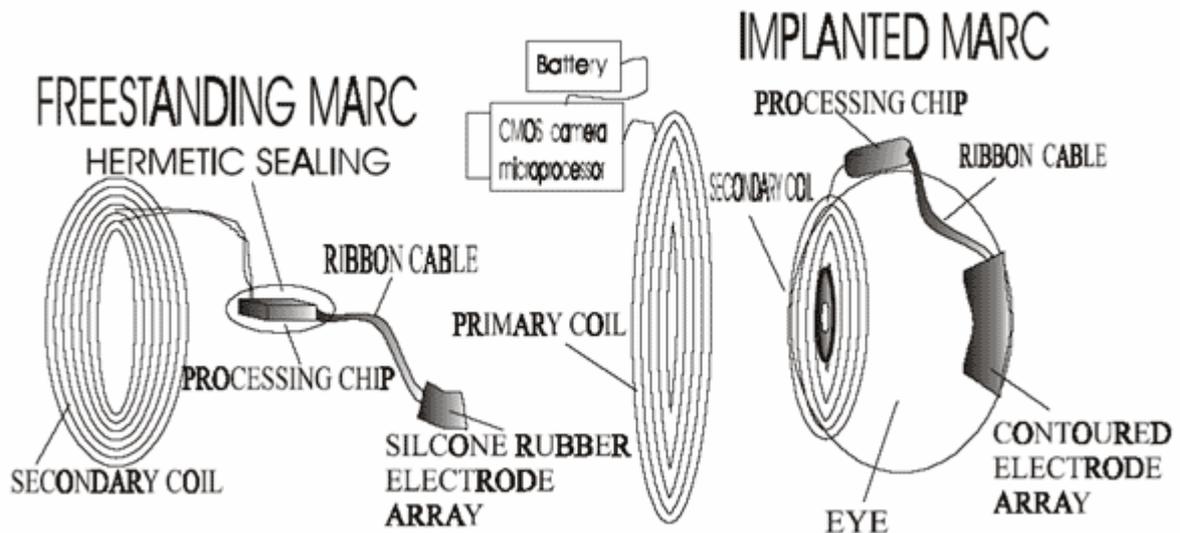


DIAGRAMA DE BLOQUES DE MARC

El sistema de MARC ("Multiple-Unit Artificial Retina Chipset") consiste básicamente de dos partes separadas físicamente, una que se halla en el exterior y una segunda que reside en el interior del globo ocular. Cada una de estas partes está equipada con un transmisor y un receptor. La bobina primaria puede ser manejada con frecuencia de portadora entre 0,5 y 10 MHz, acompañada por una señal de amplitud modulada (AM / ASK) de unos 10 KHz la cual es la que provee datos a la configuración de electrodos estimulantes. Una fuente de poder DC es obtenida de la rectificación de la señal RF que llega. El receptor en la bobina secundaria extrae cuatro (4) bits de datos por cada pixel, filtrando, demodulando y amplificando la señal RF. Dicha data es interpretada por un procesador de señales para que los electrodos generen las corrientes correspondientes a una imagen determinada.



VENTAJAS DEL SISTEMA MARC

Muchas limitaciones de avances anteriores para las prótesis visuales han sido ahora superadas por el diseño MARC:

- 1) Tamaño de los componentes: la unidad múltiple intraocular, capaz de transmitir, recibir y procesar la información para el arreglo de electrodos ha logrado un nivel de miniaturización sorprendente.
- 2) Disipación de calor: La transferencia de potencia y rectificación en las unidades de MARC son las fuente principal de disipación de calor en todo el sistema, pero este proceso ocurre en el chip (no en el arreglo de electrodos), cerca de la superficie de la córnea, que es un lugar relativamente apartado de la delicada retina.
- 3) Receptor: el procesador del sistema MARC esta colocado en las proximidades de la córnea, dicho lugar es más accesible a las radiaciones electromagnéticas, por lo que la transmisión de información por RF se hace relativamente más fácil o factible, que si en lugar de ello, el receptor se hallase directamente en el arreglo de electrodos.
- 4) Capacidad de Diagnostico: Ya que el tranciver (transmisor / receptor) se encuentra en las proximidades de la córnea, dicho dispositivo es capaz de enviar información hacia fuera del ojo, pudiendo informar del estado de todos los dispositivos, así como del correcto funcionamiento del sistema.

5) Reducción de tensión sobre la retina: este sistema reduce la tensión sobre la retina, ya que solo necesita implantar el arreglo de electrodos sobre la delicada superficie de la misma (a diferencia de “Optobionics” que incluye el procesador en dicho implante).

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE MARC

El chip es diseñado de acuerdo a determinadas obligaciones biológicas, así como a determinadas limitaciones tecnológicas impuestas por los estándares de los procesadores CMOS (“Complementary Metal Polisilicio Oxide Semiconductor”) de $2\ \mu\text{m}$ y $1,2\ \mu\text{m}$ (distancias mínimas).

Los cálculos concernientes a los requisitos de potencia para el chip, según los experimentos del Dr. Humayun, son los siguientes:

- Se requieren $600\ \mu\text{A}$ durante 2ms para una estimulación retinal inicial.
- La impedancia retinal equivalente vista por los electrodos es de $10\ \text{Kohms}$.
- Para evitar percibir “parpadeos”, deben presentarse las “imágenes” o estimulaciones eléctricas a una frecuencia de por lo menos $60\ \text{Hz}$, es decir, a cada $16,6\ \text{ms}$.

La tecnología estándar esta en la capacidad de adquirir las imágenes a la velocidad establecida por la retina. Usualmente un individuo observa una película sin “parpadeo” alguno, cuando se presentan las imágenes de una manera continua y a una velocidad de 30 cuadros por segundo. Podría pensarse que se requiere esa misma velocidad para un implante retinal. Sin embargo, debido a que la estimulación eléctrica no ocurre exactamente como ocurre de la manera natural, la tasa para fusionar las imágenes de una manera continua debe ser más alta, entre 40 y $60\ \text{Hz}$.

El enlace inductivo consiste en dos circuitos resonantes, un transmisor externo y un receptor implantado

Retina Artificial de Silicio OPTOBIONICS TM (ASR)

CARACTERÍSTICAS DEL MICROCHIP

La **Retina Artificial de Silicio** Optobionics TM (ASR) es un microchip diseñado para estimular las células retinales dañadas, permitiéndoles enviar señales visuales al cerebro. Esto es aplicable a pacientes que presenten Retinitis Pigmentosa (RP) y Degeneración Macular por envejecimiento (ADM) y posiblemente, otros problemas en la retina.

El microchip ASR TM es un chip de silicio de 2mm de diámetro y 25 μm de espesor, menor que el espesor de un cabello humano. Contiene aproximadamente 5.000 celdas solares en su superficie llamadas “microfotodiodos”, cada una con su correspondiente **electrodo** estimulante. Estos microfotodiodos están diseñados para convertir la energía proveniente de la luz (imágenes) en impulsos electroquímicos que estimulan las células dañadas, pero aún en capacidad de funcionar, de la retina.



El Chip ASR de 2mm sobre una moneda de 1centavo de Dólar

El microchip ASR es alimentado únicamente con la luz incidente y no requiere el uso de cables externos o baterías. Luego de ser implantado quirúrgicamente debajo de la retina, en un lugar denominado “área subretinal”, el ASR comienza a producir señales similares a las producidas por la capa fotorreceptora. Desde el área subretinal, estas señales fotoeléctricas artificiales provenientes del chip están en posición de inducir señales visuales biológicas en el resto de las células retinales; dichas imágenes serán procesadas y enviadas por medio del nervio óptico al cerebro.

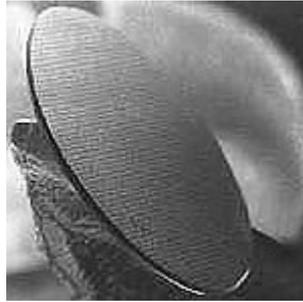
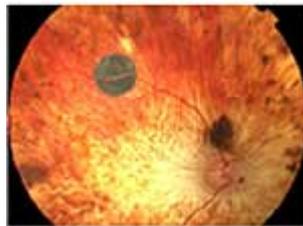


Imagen ampliada del chip ASR TM

En el laboratorio preclínico de pruebas, animales modelos implantados con el chip ASR respondieron a estímulos de luz con señales eléctricas retinales (ERG) y algunas veces con ondas cerebrales (VEP). La inducción de estas señales biológicas indica que la respuesta visual ha ocurrido.



El microchip ASR TM implantado en el ojo humano

Como ya hemos mencionado, el ASR depende de la capacidad de estimular el resto de las células funcionales dentro de una degeneración parcial interna. Por ello, el chip no es capaz de ayudar a pacientes en condiciones donde la retina está muy dañada. Tales las condiciones incluyen la retinopatía diabética, donde están presentes considerables cicatrices; glaucoma; enfermedades del nervio óptico, tales como neuropatía y neuritis ópticas; oclusiones de la arteria o la vena de la retina; ceguera causada por traumatismos en la parte del cerebro encargada de la visión, y otros problemas en la retina donde hay muchas cicatrices presentes, por ejemplo las formas más severas de retinopatía en niños prematuros.

EL PROCEDIMIENTO QUIRÚRGICO

La microcirugía es una operación sencilla y que cualquier oftalmólogo podría hacer. Consiste en una vitreotomía y retinotomía, luego de las cuales se practica un implante subretinal del chip.

El cirujano comienza haciendo tres pequeñas incisiones en la parte blanca del ojo del paciente; cada incisión no más larga que el diámetro necesario. A través de éstas, el médico extrae el “gel” existente en la mitad del ojo y lo reemplaza con solución salina.

Dicho fluido levanta una porción de la retina desde la parte posterior del ojo y crea un pequeño bolsillo en él “área subretinal” justamente del ancho necesario para alojar al microchip ASR.

Luego, el médico desliza el implante en el área subretinal, como podría depositarse una pequeña moneda en un bolsillo.

Finalmente, el cirujano introduce aire en la mitad del ojo a fin de hacer un intercambio con el fluido, y así lograr que la retina descienda cuidadosamente sobre el implante.

Durante uno o dos días, las burbujas de aire restantes son reabsorbidas y reemplazadas totalmente por fluidos producidos en el interior del ojo. El procedimiento toma alrededor de dos horas y por ser de carácter ambulatorio, el paciente no requiere hospitalización.

EXPERIMENTOS REALIZADOS Y RESULTADOS

En experimentos clínicos que se iniciaron en Junio del año 2000, cuando Optobionics implantó su microchip en el área subretinal de tres pacientes con RP, para estudiar la confiabilidad y factibilidad en el tratamiento de la pérdida de la visión. En Julio del 2001, recibieron el implante tres pacientes más.

Los pacientes estudiados presentan edades comprendidas entre los 46 y 76 años, con capacidades de visión que varían desde poder contar los dedos del examinador hasta una percepción casi nula de la luz. La cirugía fue practicada unilateralmente, de forma tal que el otro ojo sirviera de control.

Hasta el momento, los implantes han permanecido estables en su posición subretinal, han mantenido correctamente su función eléctrica y han sido muy bien tolerados por el organismo. Ningún paciente ha reportado molestias relacionadas con el implante, ni siquiera han sentido la presencia de éste en su ojo. Tampoco se han presentado signos de reacción al implante, infección, inflamación, erosión, desprendimiento de la retina o movimiento del mismo.

Todos los pacientes han notado cierto grado de mejoría en su visión, sobre todo en cuanto a la percepción de formas y luces. Dos pacientes mostraron impresionantes resultados en su precisión visual después de seguir el tratamiento.

Imágenes que no habían sido vistas en años, ahora pueden ser vistas nuevamente: las luces del árbol de Navidad, el fuego, la cara de un ser querido o, en el caso de un paciente, su propia imagen. Con esta mejoría, uno de los pacientes reportó ser capaz de comer con utensilios en lugar de utilizar únicamente las manos.

El tiempo necesario para que los cambios comiencen a observarse puede variar desde algunas semanas y hasta algunos meses, pero según los reportes las mejorías progresan durante un período de 9 a 21 meses.

“Nosotros estamos muy contentos con los resultados obtenidos, pero todavía es demasiado temprano para hacer conclusiones definitivas”, dijo el Dr. Chow. “El estudio ha sido planificado para continuarlo durante dos años más, y nosotros seguiremos evaluando a estos pacientes y practicaremos mas cirugías en nuevos candidatos”.

Sensores ultrasónicos para no videntes

El Dispositivo Treboli.

El sistema de detección combinada TREBOL.

Las alternativas de captación desarrolladas, según se ha indicado anteriormente plantean además de problemas de coste, ergonómicos y sobre todo de fiabilidad un problema de dualidad con las limitaciones consiguientes de uno u otro tipo de dispositivos. En la génesis del sistema TREBOL, dentro del proyecto CYTED Nuevas Tecnologías para la Autonomía Personal de los Discapacitados (Ceres10), se plantea un intento de establecer una solución simple y por tanto económica y fiable que presentara una combinación tanto como detector de obstáculo como de percepción somera del entorno por localización de referencias para ayuda a la orientación. Así, una vez seleccionado el principio ultrasónico con la técnica pulso-eco como el más adecuado, se configuró el sistema disponiendo un frente central de detección y dos laterales a izquierda y derecha con los fines anteriormente apuntados (Ceres). Este dispositivo está constituido por un cabezal sensor colocado a la altura del pecho y una unidad electrónica que a modo de petaca se suspende del cinturón y que realiza las funciones de excitación, recepción, procesamiento y comunicación de la información al usuario por señales acústicas convenientemente codificadas. El prototipo realizado (Ceres11), tras las pruebas de laboratorio, fue evaluado por personal especializado con personas ciegas tanto por la ONCE (Organización Nacional de Ciegos de España) como por la Universidad Pedagógica Nacional de Bogotá. En ambos casos se puede decir que los resultados no fueron en general satisfactorios; presentando algunos aspectos interesantes como era en el caso de entornos sin la existencia de numerosos accidentes (grandes pasillos...). Los problemas principales detectados, además de otros secundarios de naturaleza ergonómica, están relacionados con la excesiva cantidad de información que presentan los entornos normales, tanto domésticos como urbanos, y que captada por el triple sensor y que, incluso tras cierta depuración, es comunicada al usuario produciendo un efecto negativo de saturación. La comunicación es sin duda el punto crítico de este tipo de sistemas.

El sistema TREBOLI.

La definición del campo de detección ha planteado discusiones no solo en el equipo de trabajo sino en general en la literatura. Por todo ello y como respuesta a las limitaciones encontradas se ha desarrollado un segundo dispositivo en el que se trata en este caso de reducir la cantidad de información en la fuente, esto es, en la misma captación. Para ello se ha decidido establecer un único sector de detección frontal, de igual modo que otros sistemas existentes, si bien en este caso se introduce la opción al invidente de operar con zonas muy distintas por accionamiento de un pulsador, pudiendo así operar ya sea con un lóbulo estrecho para entornos complejos como con otro ancho para ambientes despejados. Esta estrategia se ha conseguido mediante un proceso previo de simulación que ha determinado un nuevo cabezal sensor con tres transductores en triángulo: dos emisores en disposición horizontal escasamente separados y un receptor central sobre ellos. De este modo se puede discrecionalmente actuar sobre un solo emisor, consiguiendo un lóbulo de detección amplio, de 60°, suficiente para rastreo del entorno de movimiento. De la misma forma se puede seleccionar actuar sobre ambos emisores

simultáneamente con lo que se originan interferencias destructivas laterales en el plano horizontal de ambos campos, eliminando los sectores externos y limitando así el ángulo de detección a unos 22°. En este caso la captación se restringe al pasillo de avance del ciego, detectando únicamente los obstáculos presentes en el mismo, siendo en cualquier caso 60° el ángulo vertical de detección. Este sistema incorpora un dispositivo vibrátil además del acústico como interfase de comunicación. Finalmente ha sido integrado un fotosensor que actúa alternativamente a demanda del usuario como medio de orientación por gradientes de luz, principalmente en ambientes conocidos.

Conclusiones del Sistema

El dispositivo TRIBOLI, compacto y más simple que su predecesor ha mostrado resultados positivos en laboratorio. Se espera poder confirmar en breve la validez del sistema en condiciones reales de trabajo, siempre como ayuda y no como sustitución al bastón tradicional, que siendo una verdadera prolongación de los sentidos residuales, constituye la más simple y fiable ayuda técnica para el desplazamiento de los ciegos. Estas aproximaciones presentadas ponen de manifiesto los problemas de análisis y resolución, tan estimulantes como complejos, que plantea el mundo de la Discapacidad. En nuestro caso constituyen dos etapas del camino que hemos tomado entre los muchos y largos que debemos todos recorrer para dar respuesta a las necesidades de autonomía no solo del mundo del ciego sino también desde la perspectiva de las diferentes excepcionalidades. Ello significa que es necesario ahondar en la teoría de la movilidad para esclarecer sus principios fundamentales y así mismo en una colaboración interdisciplinar en el desarrollo de soluciones tecnológicas que cubran los requerimientos de la propia movilidad y no sólo del entrenamiento.

El Electrodo Intracortical del Prof. Normann (Universidad de Utah)

Las degeneraciones retinianas (como la retinitis pigmentosa o la degeneración macular por envejecimiento) ocasionan una importante proporción de cegueras intratables, por lo que, como hemos visto, varios laboratorios en distintas partes del mundo están trabajando actualmente en el desarrollo de neuroprótesis a nivel de la retina para el tratamiento de estas patologías (Chow and Chow, Humayun y compañía). Aunque estas aproximaciones pueden ser eficaces, en muchos casos existe una importante afectación de todas las capas de la retina, por lo que su utilidad puede verse seriamente comprometida. Además las neuroprótesis retinianas no permiten el tratamiento de cegueras cuya patología afecte a las células de “ganglion” de la retina o las vías visuales extraoculares (como el nervio óptico).

Una posible alternativa, en la que está trabajando desde hace unos años el grupo del Profesor Normann de la Universidad de **Utah**, es la implantación de una neuroprótesis a nivel de la parte del cerebro que se encarga de procesar la información visual. Esta idea se basa en el hallazgo de que la estimulación eléctrica a nivel de la corteza occipital desencadena la percepción subjetiva de destellos de luz denominados técnicamente fosfenos.

Aunque el primer trabajo sobre la aparición de fosfenos tras la estimulación eléctrica se debe a Lowenstein y Borchart en 1918, fueron los estudios del grupo de Penfield en la década de los 50 los que confirmaron estos hallazgos. Más tarde Brindley y Lewin en la Universidad de Cambridge y el grupo de Dobelle en la Universidad de **Utah** hicieron prolongadas observaciones sobre los fosfenos y los estímulos eléctricos que los desencadenaban, sentando las bases para una prótesis a nivel cortical. En este sentido hay que destacar los trabajos del grupo de Dobelle (1976) en los que sujetos que habían permanecido ciegos durante largo tiempo fueron capaces de leer caracteres Braille utilizando un sistema de 6 fosfenos simultáneos incluso más rápido de lo que lo hacían a través del tacto.

Los resultados de estos estudios pusieron sin embargo de manifiesto que una neuroprótesis basada en la estimulación cortical mediante electrodos superficiales podía tener una utilidad limitada, debido fundamentalmente a factores tales como la gran cantidad de corriente necesaria para producir los fosfenos, las interacciones entre electrodos adyacentes y la producción ocasional de episodios dolorosos debidos a irritación meníngea.

Una aproximación más eficaz, que permite la activación de neuronas con un mayor grado de especificidad espacial y menores niveles de corriente, es la utilización de electrodos que penetren dentro de la corteza cerebral o intracorticales. Así, Schmidt y colaboradores han implantado recientemente (1996) 38 microelectrodos intracorticales en el córtex visual derecho de una mujer de 42 años que estaba ciega desde hacía 22 años y sus resultados demostraron que 34 de los 38 electrodos fueron capaces de producir fosfenos durante un período de 4 meses con niveles de corriente inferiores a 25 microamperios. Desafortunadamente estos electrodos no fueron diseñados para su uso crónico, por lo que algunas de sus conexiones se rompieron en los primeros días del experimento.

El **electrodo intracortical** ha sido desarrollado y optimizado especialmente para su uso crónico por el equipo del Prof. Normann (1996) en la Universidad de **UTA** (Estados Unidos). Esta red de microelectrodos posee una estructura tridimensional que permite la estimulación focal de neuronas en la capa IV del córtex visual, que es el lugar por donde fisiológicamente entra a la corteza cerebral la información procedente de los globos oculares (está situada aproximadamente 1,5 mm a partir de la superficie cerebral). El campo visual situado delante del sujeto será codificado por un pequeño dispositivo electrónico (similar a una cámara de vídeo en miniatura) situado a nivel de unas gafas convencionales. Las señales procedentes de este dispositivo serán procesadas externamente y transformadas en trenes de impulsos eléctricos optimizados para estimular las neuronas de la corteza visual a través del **electrodo intracortical** de **Utah**. La transmisión de señales entre el sistema de procesamiento de señales y el **electrodo intracortical** puede ser a través de conectores percutáneos directos, aunque también se está trabajando en el desarrollo de un sistema de conexión sin cables (sistema de telemetría).

Para que esta aproximación pueda ser realmente eficaz, no es necesario transmitir una imagen con una alta resolución y de todo el campo visual, sino transmitir una información útil (para tareas tales como leer, orientación y movilidad) a los sitios adecuados dentro del sistema visual. Para ello es imprescindible conocer cómo se codifica la información en la retina y cómo se transmite esta información a la corteza visual, por lo que ésta es una de las principales líneas de investigación que se están desarrollando actualmente.

Además, es necesario que el organismo acepte bien este tipo de implante. Los experimentos realizados por *Normann y su equipo* muestran que los materiales del **Electrodo Intracortical** de **Utah** (EIU) son bien tolerados por el organismo y que este tipo de **electrodo** es útil para la estimulación y registro crónico (más de 18 meses) de neuronas en la capa IV de la corteza visual.

Por otro lado, además de que el organismo acepte bien la neuroprótesis, es importante que la inyección de corriente a nivel cerebral sea efectiva y segura, por lo que en los últimos se ha diseñado unos dispositivos electrónicos miniaturizados capaces de inyectar pulsos de corriente específicos en cada uno de los microelectrodos individuales. Los resultados preliminares en animales de experimentación son muy alentadores y están permitiendo conocer los parámetros más adecuados para conseguir una estimulación eficaz y no dañina.

Otro prerequisite importante para la aplicación clínica de este tipo de neuroprótesis, además de que el organismo la acepte y no provoque daños, es que la corteza visual de los candidatos a esta alternativa terapéutica sea todavía capaz de procesar información visual.

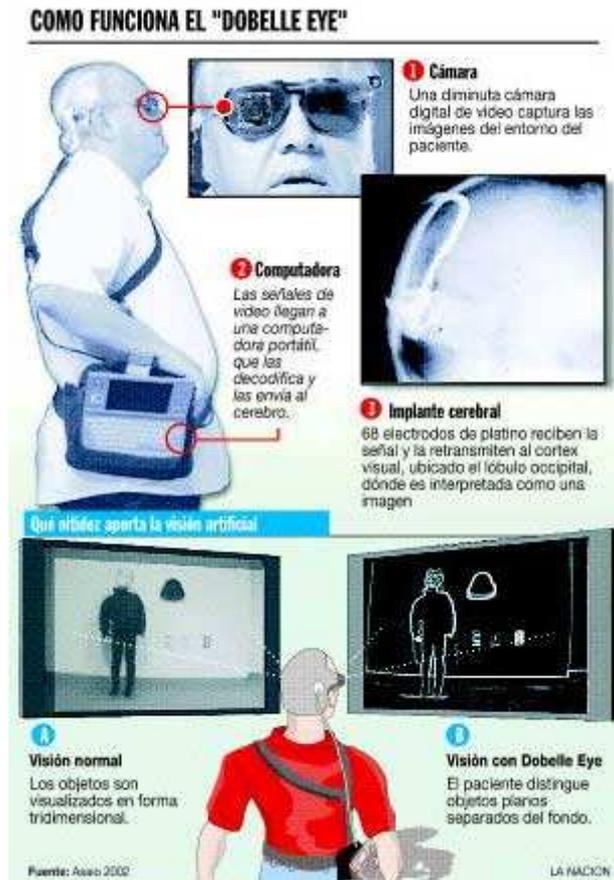
En este sentido existen estudios que han puesto de manifiesto la existencia de una serie de adaptaciones a la pérdida de visión que se caracterizan fundamentalmente por un reclutamiento de la parte del cerebro que habitualmente se encarga de procesar información visual (corteza occipital) para el procesamiento de otras modalidades sensoriales como la somatoestésica (sensibilidad, tacto) y auditiva (Pascual-Leone y compañía, 1995, 1999). Esta plasticidad cortical transmodal se asocia en general con una mejor adaptación de los individuos ciegos a su discapacidad sensorial, aunque se

desconoce si se produce por igual en todos los sujetos ciegos. Algunos de los experimentos preliminares (Pascual-Leone y colaboradores, 1999) sugieren que los sujetos con importantes déficits visuales, pero no absolutamente ciegos, junto con los que se han quedado ciegos tardíamente (a consecuencia de procesos degenerativos, accidentes, etc.) tienen más posibilidades de que su corteza visual pueda responder todavía a estímulos visuales. Estos pacientes no acaban de adaptarse bien a la pérdida de la visión y para ellos una neuroprótesis cortical podría ser una buena alternativa terapéutica.

Finalmente queremos destacar que, para que esta aproximación pueda ser verdaderamente eficaz, es imprescindible tener en cuenta la plasticidad o capacidad que presenta el Sistema Nervioso (incluso el cerebro adulto) para reamoldarse y adaptarse a cualquier nueva situación. Esta gran plasticidad también ocurre en sujetos con discapacidades visuales, por lo que se espera que, en el futuro, los sujetos portadores de estas neuroprótesis corticales aprenderán a asociar los patrones de fosfenos con el mundo físico que los rodea (inmediatamente después de la implantación de los microelectrodos, los fosfenos desencadenarán una pobre percepción del mundo exterior; sin embargo, con el paso del tiempo y el entrenamiento adecuado, el cerebro aprenderá a reconocer e interpretar cada vez mejor estos patrones).

Esto no es un concepto nuevo ni presenta un reto indescifrable ya que en el uso de prótesis auditivas este mismo problema se ha resuelto satisfactoriamente. Las prótesis codifican señales acústicas con un rango de frecuencias muchísimo más limitado que las bandas que somos capaces de diferenciar con nuestro oído. Sin embargo, con entrenamiento y gracias a la plasticidad cerebral, los humanos sordos son capaces de adaptarse al nuevo mundo auditivo creado por la prótesis y funcionar como sujetos oyentes. Esta misma esperanza, traducida al mundo visual, existe y alienta la labor en el desarrollo de este tipo de prótesis visuales.

Dobelle Eye



El investigador norteamericano William H. Dobelle presentó ocho pacientes a los que se les implantó una versión mejorada del primer sistema de visión artificial en el que lleva invertidas tres décadas de trabajo.

El prototipo, apodado "Dobelle Eye", consta de una diminuta cámara digital que se monta en los anteojos del paciente; conectada a una computadora portátil traduce las imágenes en señales eléctricas y las envía a un dispositivo implantado en la región del cerebro llamada cortex visual. El resultado es una visión acotada que permite la autonomía del paciente.

De los ocho pacientes que recibieron la nueva versión del dispositivo, uno es argentino: Edmundo, de 51 años, perdió la vista a los 22, en un accidente automovilístico. En abril, tras una operación de cuatro horas realizada en un centro que el Instituto Dobelle posee en Lisboa, Portugal, Edmundo volvió a ver.

"El concepto básico del dispositivo desarrollado por el doctor Dobelle es decodificar las señales eléctricas que normalmente llegan al área de la visión del cerebro, ubicada en el lóbulo occipital, desde la retina", explicó a LA NACION el doctor Pablo Argibay, experto en órganos bioartificiales del Hospital Italiano, que presenció la conferencia que el investigador norteamericano dio en Nueva York.

"Los bioingenieros estudiaron este proceso mediante técnicas de potenciales evocados, y lograron decodificar las señales de una cámara de televisión, de tal manera que

puedan ser interpretadas por el cerebro -continúa-. De este modo, el cerebro lee un sistema de sombras y matices que permiten una visión limitada."

Vale aclarar que este dispositivo sólo es de utilidad para aquellos pacientes ciegos que conservan intacta una región del cerebro denominada cortex visual.

Diseñan un 'ojo electrónico' que ayudará a los invidentes a cruzar las calles

Un "ojo electrónico" que se puede adaptar a unas gafas podría ayudar a los invidentes a cruzar las calles con más seguridad. Un grupo de investigadores del Instituto de Tecnología de Kioto, en Japón, han desarrollado este sistema que utiliza una cámara y un ordenador para detectar el paso de cebra, así como su ancho y el color de los semáforos.

"La cámara se montaría al nivel del ojo y estaría conectada a una microcomputadora. Transmitiría la información mediante un sistema de voz que aportaría instrucciones y datos a través de una bocina pequeña ubicada cerca del oído", ha dicho en un comunicado el profesor Tadayoshi Shioyama, uno de los científicos que trabaja en el proyecto.

La cámara diseñada por Shioyama y Mohammad Uddin aparece descrita en la revista *Measurement Science and Technology*, una publicación del Instituto de Física de Reino Unido.

"Han combinado estas tres cosas en una cámara y un ordenador", ha afirmado un portavoz del instituto. "La cámara puede transmitir datos de inmediato que incluyen toda la información necesaria para cruzar la calle con seguridad. Por eso es un avance tan importante".

Mientras hacían pruebas con el sistema, éste pudo detectar satisfactoriamente los puntos de cruce en 194 de 196 intentos, según los científicos. En dos casos, el sistema indicó erróneamente que no había un punto de cruce cuando, de hecho, sí existía.

Los científicos están investigando ahora la mejor forma de incorporar el dispositivo a un par de gafas para que los invidentes los usen con toda comodidad. "La movilidad es un asunto muy importante para los invidentes y para las personas con deficiencias visuales. Siempre se aprecian nuevos dispositivos, como este, que ayuden a la gente con trastornos de la vista a moverse con seguridad", ha dicho Katharine Phipps.

Un sistema de microchips permitirá a ciegos recuperar visión

La Universidad Miguel Hernández (UMH) de Elche lidera un proyecto europeo que une el esfuerzo de cinco países distintos para el desarrollo de neuroprótesis y microchips implantados en el cerebro que permita a los ciegos recobrar parte de visión. El proyecto, compuesto por ocho grupos de trabajo multidisciplinar, está dotado con una aportación de 3,41 millones de euros y tiene un plazo de vigencia hasta principios de 2004.

El coordinador de las investigaciones, el profesor y miembro del Instituto de Bioingeniería Eduardo Fernández, explicó que "se trata de buscar un sistema que permita implantar un chip en el cerebro que procese la visión". No obstante, Fernández destacó que "no será una visión como tal, sino más restringida; que no detectará ni el color ni los matices", pero que servirá para lograr que los invidentes puedan orientarse y moverse hasta poder hacer una vida normal. El coordinador del proyecto presentó un microchip de un centímetro, que ha sido experimentado en ratones, gatos y conejos "con buenos resultados", lo que les permite "ser optimistas".

En las investigaciones participan Austria, Alemania, Portugal y Francia, además de la Universidad de Granada.

Avances tecnológicos para ciegos

La Unión Europea ha dado fondos por valor de 3,8 millones de euros a un total de 13 equipos de investigación europeos para desarrollar sistemas que mejoren las posibilidades que tienen las personas ciegas para acceder a Internet. El proyecto, cuya duración será de 3 años, forma parte de la llamada "*Enabled Initiative*".

Según el director del proyecto, el científico Profesor Marshall de la Queens University, "*Si no se resuelve el problema de inaccesibilidad (para personas ciegas), la discrepancia conocida como la brecha digital empeorará*". En un artículo con BBC Technology, el científico dice que Internet y las nuevas tecnologías están transformando la forma en la que las personas vivimos y realizamos tareas diarias, pero muchos de los nuevos avances tecnológicos siguen estando fuera del alcance de personas con minusvalías como la ceguera.

Los científicos pretenden desarrollar avances como pantallas táctiles con mejor tecnología y mayores prestaciones que las que actualmente existen.

También se investigará la aplicación de sistemas más avanzados de audio así como la posibilidad de utilizar aparatos móviles que sirvan para guiar a personas ciegas a través de sistemas de audio. Según el profesor Marshall, al implantar aparatos en zonas públicas, como centros comerciales, sería posible anunciar la localización de tiendas al pasar por delante una persona ciega que llevase encima un aparato con este tipo de tecnología incorporado.

Conclusión

Los sistemas biológicos realizan muchas tareas de procesamiento complejas con una eficiencia que aún no está al alcance de sistemas artificiales. Por ello la biología constituye un buen referente para implementar sistemas que realicen tareas que los seres vivos desarrollan de forma natural, como es el caso de la visión, el aprendizaje de movimientos, coordinación motora, etc. Los proyectos citados tratan de abordar numerosos retos a lograr por los sistemas artificiales y que son inherentes a los sistemas naturales, entre otros se encuentran el procesamiento eficiente y en tiempo real de numerosas entradas procedentes de múltiples sensores, procesamiento de señales representadas mediante eventos asíncronos, e integración temporal de información en escalas de tiempo muy distintas, desde las propias de la dinámica de las sinapsis y del cuerpo celular neuronal hasta las asociadas con la adaptación o aprendizaje.

El hardware reconfigurable es una buena opción para el prototipo e implementación de sistemas neuromórficos, ya que con aquel se pueden definir arquitecturas de gran complejidad e implementar sistemas que requieran mecanismos de adaptación, plasticidad y aprendizaje a medio-largo plazo; es decir, cubren muchas de las necesidades de los sistemas neuromórficos.

La aplicación del hardware reconfigurable al campo de la visión artificial está cada vez más extendida, para situaciones en las que el procesamiento en tiempo real es necesario.

En este sentido los proyectos ECOVISION y CORTIVIS exploran las posibilidades de plataformas de tipo FPGA para aplicaciones relacionadas con la visión artificial. Por otro lado, la robótica es un campo en el que también tiene sentido la utilización de chips FPGA ya que el procesamiento en tiempo real es necesario para estudiar en situaciones reales las interacciones entre el robot y el medio (ciclo cerrado percepción-acción), y la reconfiguración permite la adaptación a medios cambiantes.

En cuanto a lo que se refiere a los desafíos técnicos y económicos, la investigación científica básica y aplicada es fundamental para el desarrollo futuro de las neuroprótesis implantables. Es necesario conocer el funcionamiento normal del sistema nervioso para poder desarrollar artefactos que lo "mimetecen" y se interconecten con él. Se requiere además poder extraer las señales nerviosas con dispositivos implantados en forma crónica y diseñar estimuladores implantables para la estimulación muscular. Por último deben desarrollarse computadoras "inteligentes" para controlar la actividad de los estimuladores teniendo en cuenta los efectos producidos.

Es importante destacar los aportes de investigadores latinoamericanos al desarrollo de neuroprótesis. Los ingenieros uruguayos Sergio Basalo (del grupo del Hospital Maciel) y Mario Svisrsky, (del Massachusetts Institute of Technology) han logrado avances significativos en la optimización del código de impulsos que estimula el nervio auditivo. El Dr. J. A. Hoffer, radicado desde hace años en Canadá, dirige un activo grupo de trabajo en la Universidad Simón Fraser de British Columbia. Este grupo ha realizado aportes importantes para el desarrollo de sensores de la actividad de los nervios periféricos y es un grupo líder en el desarrollo de prótesis implantables.

Un segundo factor determinante para la utilización del recurso terapéutico es la accesibilidad desde el punto de vista económico. Los costos de estos dispositivos exceden las posibilidades del sistema de asistencia médica colectivizada de nuestro país.

En conclusión, las neuroprótesis brindan expectativas interesantes para los pacientes portadores de lesiones del sistema nervioso y de los órganos de los sentidos. Sin embargo, su utilización actual está restringida a algunos casos seleccionados. En los próximos años, con el incremento de los conocimientos sobre el sistema nervioso y el desarrollo de nuevas tecnologías electrónicas e informáticas, podrían aparecer nuevos dispositivos capaces de satisfacer las necesidades de grupos cada vez más amplios de pacientes. Sin embargo, es un desafío para los científicos, neurobiólogos, médicos y bioingenieros, y para los Poderes Públicos encargados de coordinar las políticas de ciencia y de salud lograr que dichas tecnologías sean cada vez más útiles y accesibles.

BIBLIOGRAFÍA

“La Retinitis Pigmentosa”. Methodist Health Care System:
<http://www.methodisthealth.com/spanish/eyecare/retin.htm>

“Degeneración Macular Relacionada con la Edad (Su sigla en inglés es ADM)”. Methodist Health Care System:
<http://www.methodisthealth.com/spanish/eyecare/macular.htm>

Artificial Silicio Retina. OPTOBIONICS CORPORATION (2002):
<http://www.optobionics.com>

“Microelectronic Retinal Implants”. American Academy of Ophthalmology (2000):
http://www.aao.org/aaof/education/library/rcr_microelectronic.cfm

“Construyendo el Ojo Biónico”. Alcón Laboratorios (2002):
<http://www.alconlabs.com/ar/aj/new/N0070.jhtml>

Humayun, Mark. INTRAOCULAR RETINAL PROSTHESIS (2001):
www.aosonline.org/xactions/markthes.pdf

El CENTRO DE RECURSOS para personas sordociegas.
<http://www.sordoceguera.org/Sordoceguera/Definici%F3n/C%F3mo%20funciona%20e1%20ojo.htm>

Páginas web de las siguientes Instituciones:

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada

ONCE (Organización Nacional de Ciegos de España)

Universidad Simón Fraser de British Columbia

Escuela Colombiana de Carreras Industriales. Escuela Tecnológica. CIB (Centro de Investigación de Bioingeniería)

SENC (Sociedad española de Neurociencia)

Universidad Pedagógica Nacional de Bogotá - Colombia.

